

Desenvolvimento de um sistema háptico com feedback de temperatura

Martim César Margarido

Dissertação de Mestrado

Orientador: Joaquim Gabriel Magalhães Mendes



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Especialização em Automação

Fevereiro de 2018

À minha avó,

Resumo

Na superfície da pele, é possível encontrar, embora numa concentração desigual conforme as regiões do corpo, uma série de elementos recetores que respondem a determinados estímulos, enviando informações para o sistema nervoso central de modo a que possam ser devidamente interpretados. Dada esta dispersão diversa de recetores, certas extremidades, como os dedos das mãos, possuem uma discriminação muito maior do que as demais partes, sendo por isso muito mais sensíveis a tais estímulos.

Os sistemas hápticos recriam estímulos sensoriais de feedback para o utilizador, seja simulando a pressão, a textura, a vibração ou a temperatura.

O objetivo deste trabalho foi recriar variações de temperatura percecionadas pelo toque no rato do computador recorrendo a um elemento de Peltier de modo a despertar sensações de frio e/ou calor. Dado o crescente interesse em soluções vocacionadas para a faixa da população mais idosa que estimulem a atividade cognitiva criou-se um jogo com uma interface gráfica apelativa.

A presente dissertação envolveu uma fase de exploração de soluções tecnológicas existentes, seguida de conceção e realização de um sistema controlado por um microcontrolador *Arduino UNO*®, do módulo de potência e da interface gráfica em computador, usando a plataforma de jogos *Processing*®.

Quanto ao hardware utilizado, recorreu-se a uma ponte H para inverter o sentido da corrente de alimentação, a um termopar para medição da temperatura do elemento de Peltier e um LCD para visualizar alguns parâmetros do sistema.

O sistema encontra-se funcional, ficando a faltar o teste e validação em ambiente clínico.

Abstract

On the skin surface, it is possible to find, although in an uneven concentration according to the regions of the body, a series of receptors that respond to certain stimuli, sending information to the central nervous system so that they can be properly interpreted. Given this diverse dispersion of receptors, certain extremities, such as the fingers, have a much greater discrimination than other parts, and are therefore much more sensitive to such inducements.

Haptic systems recreate sensory feedback stimuli for the user, either by simulating pressure, texture, vibration or temperature.

The goal of this assignment was to recreate temperature variations perceived by the touch in the computer mouse using a Peltier element in order to stimulate hot and/or cold feelings. Given the growing interest in solutions targeting the elderly that stimulate cognitive activity, a game with an appealing graphic interface was created.

The present dissertation involved a phase of exploring existing technological solutions, followed by the design and realization of a system, controlled by an *Arduino* UNO microcontroller, its power module, and a computer graphic interface, using the gaming platform *Processing*.

Regarding the hardware, an H-bridge was used to reverse the direction of the power supply, a thermocouple for measuring the temperature of the Peltier element and an LCD to visualize some parameters of the system.

The system is functional, lacking the test and validation in clinical environment.

Agradecimentos

Serve a presente secção para agradecer a todos os que tornaram esta dissertação possível e que me auxiliaram no seu decurso.

Em primeiro lugar, ao meu orientador, Prof. Joaquim Gabriel pela proposta aliciante apresentada, disponibilidade e apoio demonstrados ao longo do período desta dissertação.

Gostaria de agradecer também à Prof.^a Maria Teresa Restivo pela possibilidade de poder desenvolver este trabalho no LIM e também pelo auxílio prestado.

Um agradecimento aos meus colegas de laboratório, em particular ao Rafael Tavares, pelos seus conselhos, conhecimento partilhado e bom ambiente proporcionado.

Quero agradecer também a todos os meus amigos e colegas do curso que, de uma maneira ou de outra, facilitaram o meu percurso académico, direta ou indiretamente.

Um obrigado à minha família, em especial aos meus pais, por sempre suportarem os custos da minha educação e por nunca me terem faltado com nada.

A todos, um grande obrigado.

Índice de Conteúdos

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura desta dissertação.....	2
Capítulo 2 - Estado da Arte	3
2.1 Tecnologia háptica.....	3
2.2 Dispositivos hápticos.....	4
2.3 Dispositivos hápticos com feedback de temperatura.....	4
2.3.1 Plataforma Holística de Educação Háptica	5
2.3.2 Gloveone.....	6
2.3.3 ThermoVR	7
2.4 Efeito termoelétrico	8
Capítulo 3 - Desenvolvimento e implementação do protótipo	11
3.1 Arquitetura da solução.....	11
3.2 Implementação da ponte H.....	12
3.3 Escolha do elemento de Peltier.....	13
3.4 Sensor de temperatura	14
3.5 Liquid Crystal Display (LCD).....	16
3.6 Controlador de temperatura	17
3.7 Interface gráfica.....	20
Capítulo 4 - Validação experimental	27
4.1 Elemento de Peltier 8x8.....	27
4.1.1 Aquecimento.....	27
4.1.2 Arrefecimento	29

4.2 Elemento de Peltier 40x40.....	30
4.2.1 Aquecimento.....	30
4.2.2 Arrefecimento.....	31
4.3 Escolha final do elemento de Peltier e condições de funcionamento.....	31
4.4 Controlo do elemento de Peltier	32
4.4.1 Controlo ON/OFF de temperatura.....	33
4.4.2 Controlador PID	34
4.4.3 Controlo por tempo de resposta.....	35
Capítulo 5 - Conclusões e trabalhos futuros.....	37
5.1 Conclusões.....	37
5.2 Trabalhos futuros.....	38
Referências	39
Anexo A: Elemento de Peltier	41

Índice de figuras

Figura 2.1 - a) Sistema de força com feedback linkage-based PHANTOM Desktop; b) Sistema de força com feedback tension-based de 7 graus de liberdade; c) Modelo de feedback tension-based, criado por Seahak Kim [1].....	4
Figura 2.2 - Esquema da plataforma educacional desenvolvida [5].....	5
Figura 2.3 - Luva háptica Gloveone, da NeuroDigital [7]	6
Figura 2.4 - Sistema: (a) ThermoVR HMD; (b) Imagens térmicas dos módulos em arrefecimento (esquerda) e aquecimento (direita); Aplicações VR (c) abrindo o frigorífico, (d) perto de um fogão; Sensação dinâmica de temperatura em ambiente virtual: (e) ventoinha, (f) calor do sol; Sensação dinâmica de temperatura em vídeo: (g) gotas de água, (h) calor do secador [8]	7
Figura 2.5 - Esquema do efeito de Peltier [22].....	8
Figura 2.6 - Esquema de construção de um elemento de Peltier [15]	9
Figura 3.1 - Esquema da arquitetura da solução proposta.....	11
Figura 3.2 – (baseado em [23]) - Esquema de funcionamento de uma ponte H - a) transístores da ponte em corte, b) alimentação do Peltier com corrente no sentido positivo, c) alimentação do Peltier com corrente no sentido negativo	12
Figura 3.3 - Esquema de montagem entre Arduino e integrado de dupla Ponte H [24].....	13
Figura 3.4 - (baseado em [25]) - Configuração de pinos do integrado MAX31855	16
Figura 3.5 - Configuração de pinos do LCD e ligação à placa Arduino [25].....	17
Figura 3.6 - Duty cycle PWM [26].....	19
Figura 3.7 – a) Setup inicial do jogo; b) Tela quando jogador acerta na quadrícula que contém o objeto	21
Figura 3.8 - Distribuição das diferentes temperaturas projetadas ao longo da tela.....	22
Figura 3.9 - Comunicação Processing/Arduino, envio de caracteres consoante posição do rato	23
Figura 3.10 – a) Setup inicial do jogo; b) Ecrã ao escolher a opção “Jogar”	24

Figura 3.11 - Comunicação Processing/Arduino, envio de caracteres consoante paridade do número gerado	25
Figura 4.1 - Temperatura e taxa de aquecimento, Peltier 8x8	28
Figura 4.2 - Temperatura e taxa de arrefecimento sem remoção de calor, Peltier 8x8	29
Figura 4.3 - Temperatura e taxa de arrefecimento com remoção de calor, Peltier 8x8.....	30
Figura 4.4 - Temperatura e taxa de aquecimento, Peltier 40x40	30
Figura 4.5 - Temperatura e taxa de arrefecimento com remoção de calor, Peltier 40x40.....	31
Figura 4.6 - Controlo ON/OFF de temperatura para dois pares de valores distintos	34
Figura 4.7 - Controlo com um PID ajustado com diversos parâmetros (P, PI e PID).....	35
Figura 4.8 - Controlo por tempo de resposta	36

Índice de tabelas

Tabela 3.1 - Tabela de avaliação dos diferentes sensores de temperatura	14
---	----

Lista de acrónimos

ADC – *Analog-to-Digital Converter*

CPU - *Central Processing Unit*

HMD - *Head Mounted Displays*

IC – *Integrated Circuit*

IMU – *Inertial Measurement Unit*

LCD – *Liquid Crystal Display*

LIM – Laboratório de Instrumentação e Medição

MR - Magnetoreológico

NTC - *Negative Temperature Coefficient*

PCB – *Printed Circuit Board*

PID - Proporcional Integral Derivativo

PWM – *Pulse Width Modulation*

SPD - *Sensory Processing Disorder*

SPI - *Serial Peripheral Interface*

TEC - *Thermoelectric Cooler*

USB - *Universal Serial Bus*

VR - *Virtual Reality*

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

Esta dissertação insere-se no âmbito da conclusão do ciclo de estudos do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, área de especialização de Automação, Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Neste estudo foi levada a cabo a implementação de um elemento de Peltier num rato de computador como parte integrante de um jogo com carácter não só lúdico mas, primordialmente, com finalidade de reabilitação, através da perceção e estimulação tátil.

Define-se perceção tátil como sendo a capacidade do ser humano perceber, através da pele, as características de um objeto (forma, tamanho e textura) além de outras sensações como pressão, temperatura ou dor, possibilitando uma adequada relação com o ambiente e objetos, assim como a proteção e reação a estímulos nocivos [1]. Certos indivíduos carecem desta característica, habitualmente intrínseca de todos os seres humanos, não reagindo normalmente aos estímulos a que estão a ser expostos, sofrendo de *Sensory Processing Disorder* (SPD).

SPD é uma condição que existe quando a integração multissensorial não é processada de forma a fornecer respostas adequadas às demandas do meio ambiente [2]. Esta anomalia pode por vezes surgir interligada a outras anomalias mais conhecidas, como demência ou Asperger. Estima-se que cerca de 5% das crianças demonstra sintomas de SPD [2][3].

Esta dissertação é motivada pela possibilidade de criar um dispositivo com finalidade de estimular a perceção sensorial e deste modo auxiliar as pessoas que sofram de algum tipo de deficiência cognitiva, ou simplesmente cuja perceção tátil seja deficitária.

1.2 Objetivos

O propósito deste trabalho consiste, como mencionado, no desenvolvimento de um ambiente recreativo cuja interação com o utilizador desperte nestas sensações térmicas de calor ou frio, através de um elemento de Peltier, sendo o público-alvo pessoas com deficiência sensorial tátil, que acompanha frequentemente os estados de demência.

Espera-se que o sistema seja capaz de interagir com o utilizador, e que desperte nestas sensações térmicas de forma eficaz, segura e interativa. Como tal, as tarefas principais a executar para a conceção do sistema serão as seguintes:

- Seleção e controlo do elemento de Peltier;
- Conceção e desenvolvimento de interface lúdica para o utilizador;
- Implementação da prova de conceito;
- Teste da prova de conceito em laboratório.

1.3 Estrutura desta dissertação

A presente dissertação é composta por 5 capítulos.

- Capítulo 1 – Introdução – é feita uma curta apresentação do tema da dissertação, motivação, enquadramento, estrutura e metas a atingir;
- Capítulo 2 – Estado da Arte – é apresentada uma breve revisão bibliográfica de dispositivos hápticos com enfoque nos de temperatura, bem como soluções existentes no mercado e descrição do seu princípio de funcionamento;
- Capítulo 3 – Desenvolvimento e implementação do protótipo – Este capítulo enuncia os principais passos efetuados para a conceção do sistema final de forma a cumprir o seu desígnio, desde discussão da arquitetura da solução, escolha de elementos, opções tomadas, interface gráfica, integração entre softwares, dispositivos de sensorização, entre outros;
- Capítulo 4 – Validação experimental – Estuda-se o desempenho do dispositivo tendo em conta rapidez de resposta e a gama de temperaturas que apresenta;
- Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros – Revisão e análise do trabalho efetuado e discussão de evolução da prova de conceito realizada.

Capítulo 2 - Estado da Arte

Os dispositivos hápticos constituem um tema de interesse atual, situando-se na vanguarda tecnológica da interação com sistemas virtuais ou reais, em vários domínios. No âmbito da reabilitação, o seu contributo pode fomentar o treino repetitivo, usando as suas capacidades de feedback para criar impulsos ou estímulos de modo a monitorizar a resposta do paciente. Associado aos videojogos, tais estímulos ajudam a recriar um ambiente imersivo de realidade virtual (VR). Os dispositivos hápticos podem ser utilizados por exemplo no apoio a cirurgias remotas.

Este capítulo visa, numa primeira etapa, fazer um levantamento do que é um dispositivo háptico, dando enfoque aos que fornecem feedback de temperatura e explorando as soluções existentes neste campo. Apresentam-se posteriormente os princípios de funcionamento e tecnologia associadas a estes, abordando o efeito termoelétrico, o elemento de Peltier e o controlo do mesmo.

2.1 Tecnologia háptica

Como referido no capítulo anterior, os sistemas hápticos comunicam sensações aos utilizadores. A palavra deriva do grego *haptikos*, que significa “sensível ao tato”. Esta estimulação é por norma assistida por computador e vem lado a lado com o conceito de realidade virtual, que explora a interação de um ambiente virtual com os sentidos do utilizador, através do que se denomina por feedback háptico [4]. No caso em estudo, o feedback háptico resulta na sensação de frio ou quente que o utilizador sente fisicamente, ao mover o rato do computador sobre o monitor onde uma aplicação de software lhe oferece um desafio a cumprir.

2.2 Dispositivos hápticos

Os dispositivos hápticos recebem como input informações de posição, velocidade, entre outros, que resultam da manipulação física do utilizador e fornecem sensações realistas em função de um algoritmo pré-definido [4]. Neste sentido, um rato de computador é um dispositivo cuja informação flui apenas num só sentido, do utilizador para o dispositivo (posição) que este processa, não havendo em geral um feedback.

Os sistemas hápticos com feedback de força são os mais comumente encontrados na indústria. Existem dois tipos principais de atuação, *linkage-based* e *tension-based*. Os primeiros consistem num braço robótico cuja posição da sua extremidade é monitorizada, exercendo uma força de reação consoante a posição onde se encontra. Esta força é conseguida através da combinação do movimento de juntas com binários exercidos pelos motores do braço robótico. Já o segundo método, em vez de usar controlos remotos para gerar feedback, recorre a cabos ligados ao ponto de contacto que exercem força consoante a sua extensão, sendo esta determinada por um codificador digital. A figura 2.1 mostra um exemplo de cada uma destas tecnologias.

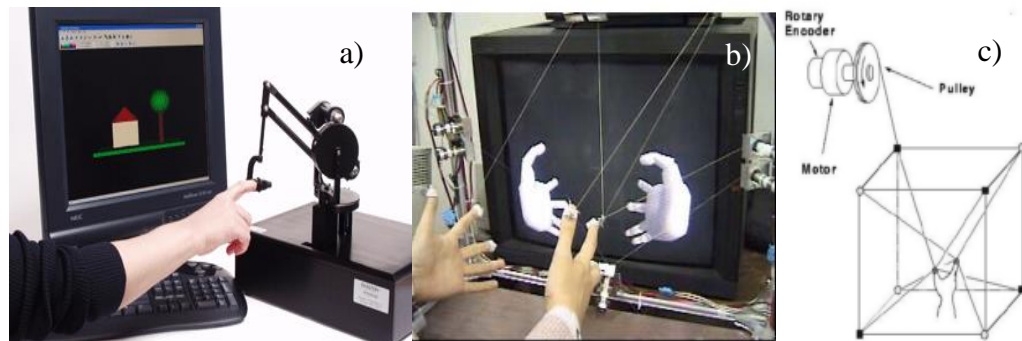


Figura 2.1 - a) Sistema de força com feedback linkage-based PHANTOM Desktop; b) Sistema de força com feedback tension-based de 7 graus de liberdade; c) Modelo de feedback tension-based, criado por Seahak Kim [1]

2.3 Dispositivos hápticos com feedback de temperatura

Como referido, este trabalho visa criar um dispositivo cuja saída seja uma variação de temperatura do elemento, pelo que serão aqui exploradas as soluções existentes com esta mesma finalidade, bem como o seu modo de funcionamento e características. De notar que apesar das diferentes finalidades do produto, todas as soluções enunciadas recorrem a

elementos de Peltier para produzir uma resposta térmica, podendo diferir apenas no seu modo de implementação e controlo.

2.3.1 Plataforma Holística de Educação Háptica

O desenvolvimento e teste de uma plataforma holística de educação háptica para crianças com défice de atenção foi o objetivo do trabalho descrito na referência [5]. O desenvolvimento oferece um sistema portátil e funções controladas por smartphone, para que os professores possam recriar facilmente várias sensações hápticas.

A estrutura geral do sistema pode ser observada na figura 2.2 e consiste em recriar 3 sensações: vibração, temperatura, e rigidez. Relativamente à vibração, gera-se informação vibrotátil usando quatro atuadores vibrotáteis que estão ligados a uma placa. Para variar a dureza de um objeto alvo, usam-se fluidos MR (magnetoreológicos), sendo esta propriedade do material alterada pelo campo magnético aplicado [5].

A parte térmica recorre a um elemento de Peltier colocado na superfície do sistema proposto para fácil acesso do dedo do utilizador. O objetivo do elemento térmico é criar a temperatura desejada e mantê-la. Para manter a temperatura desejada, o elemento é controlado por um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID). Neste esquema de controlo, um sensor de temperatura (semitec, 223Fu3122-07U015) é colocado em contacto com a superfície do elemento de Peltier para permitir a medição de temperatura da superfície [5].

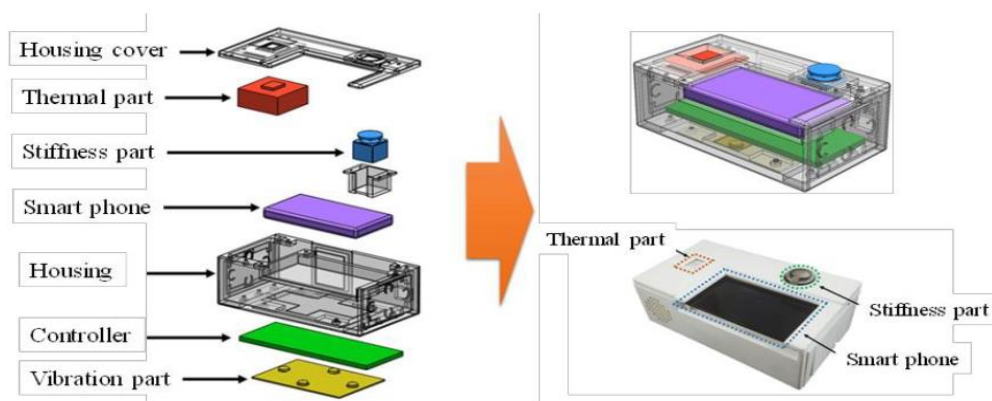


Figura 2.2 - Esquema da plataforma educacional desenvolvida [5]

2.3.2 Gloveone

O Gloveone é uma luva que permite uma variedade de estímulos ao utilizador, como forças, vibrações ou sensações térmicas. Um ambiente virtual é disponibilizado num monitor para que o utilizador da luva possa interagir com o meio em função do feedback recebido. À semelhança do Gloveone, outras marcas como a Control VR, PowerClaw e Manus VR, partilham também deste conceito e criaram luvas com feedback háptico. Aplicações de realidade virtual, como o HoloLens da Microsoft, não conseguem por si só recriar a sensação tátil dos objetos que constituem o ambiente recriado. Eles necessitam de dispositivos hápticos para comunicarem ao utilizador essas sensações. Este conjunto de soluções (software e dispositivo háptico) associam o conceito de realidade virtual à sensação física de tocar e sentir os elementos que a rodeiam [6].

O Gloveone acompanha a posição das mãos e dedos através de várias unidades de medição inerciais (IMU's). Os IMU's são dispositivos eletrónicos que medem a aceleração linear e velocidade angular de um corpo, recorrendo a um acelerómetro e a um giroscópio respetivamente. Quando integrados no Gloveone, estes valores são convertidos na posição linear ou angular do objeto, recorrendo a um magnetómetro para correção de erros de orientação do mesmo. O Gloveone possui ainda atuadores vibrotáteis que podem ser solicitados individualmente para uma sensação mais realista ao toque [7].

Em termos térmicos, a luva também é capaz de recriar no utilizador sensações de calor e frio, recorrendo a células termoeletricas posicionadas no tecido. Em conjunto com os IMU's, este produto garante a possibilidade de reproduzir sensações térmicas em relação aos diferentes objetos, consoante a posição onde a luva se encontra. A figura 2.3 apresenta uma descrição pictórica da estrutura deste dispositivo.

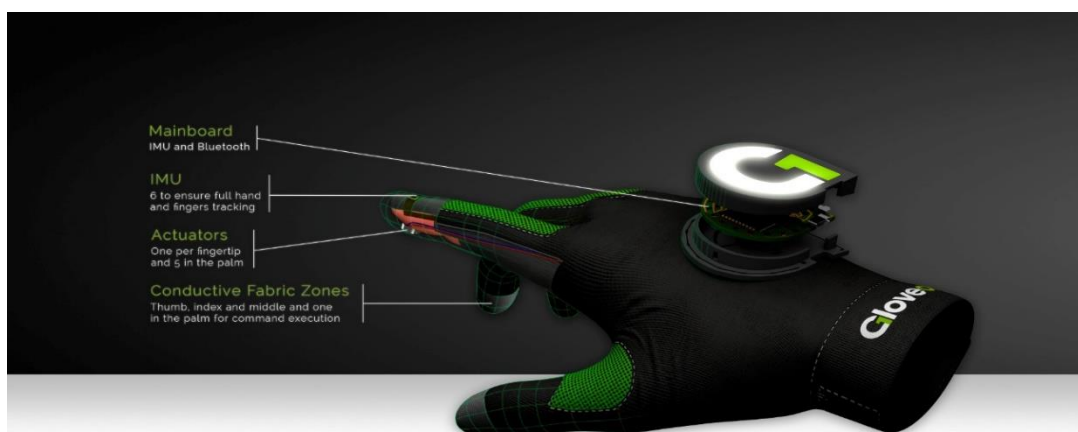


Figura 2.3 - Luva háptica Gloveone, da NeuroDigital [7]

2.3.3 ThermoVR

O ThermoVR é possivelmente a solução existente mais avançada e progressista, consistindo num dispositivo de feedback térmico integrado num Head Mounted Display (HMD). Os HMD's são dispositivos usados na cabeça, ou como parte integrante de um capacete, e possuem um display ótico à frente de um ou de ambos os olhos, HMD monocular ou binocular, respetivamente. Os HMD's estão a ganhar protagonismo, sendo já o principal dispositivo para simular ambientes virtuais e recriar experiências imersivas [8].

O ThermoVR apresenta a capacidade de gerar sensações de calor ou frio através de 5 módulos de Peltier (cuja definição será vista em detalhe mais adiante) colocados no HMD e em contacto contínuo com a face do utilizador, conjugando o feedback térmico proporcionado pelos módulos com a parte visual do HMD [9]. Cada módulo inclui 4 elementos de Peltier sendo que dois deles, dispostos em diagonal, são usados somente para aquecimento enquanto os outros dois, na diagonal oposta, são usados exclusivamente para arrefecimento, alcançando respostas térmicas rápidas. Os módulos de Peltier estão em contacto com três localizações: na testa e na área imediatamente abaixo de cada olho. São controlados por um *Arduino* Mega, empregando um controlador PID em malha fechada.

Este dispositivo tem ainda a particularidade de ser capaz de reproduzir sensações térmicas de movimento, ajustando o intervalo de estímulos entre dois módulos para criar essa sensação [8].

A aplicação foi testada em cenários virtuais, bem como em vídeos, podendo incorporar ou não a sensação dinâmica de temperaturas consoante o caso. A figura 2.4 ilustra o funcionamento e disposição de componentes, tal como nos casos experimentais a que o dispositivo foi submetido, para melhor perceção do mesmo.

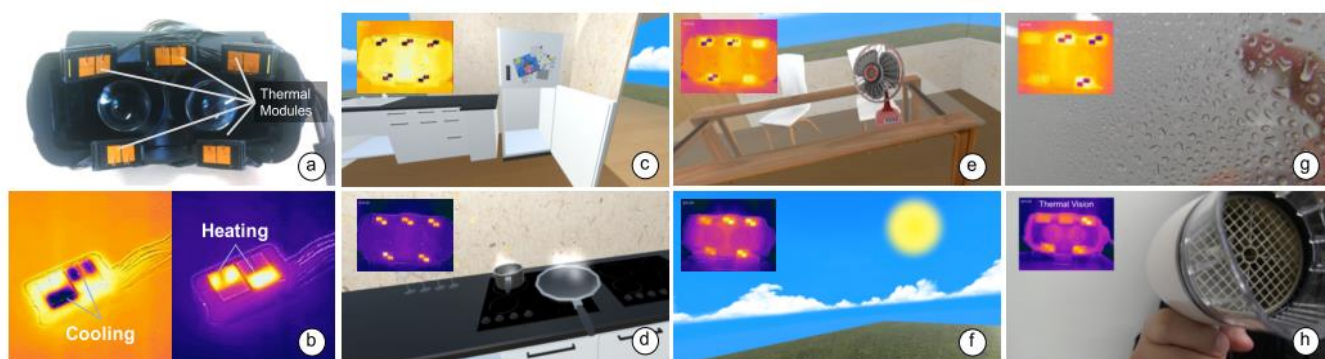


Figura 2.4 - Sistema: (a) ThermoVR HMD; (b) Imagens térmicas dos módulos em arrefecimento (esquerda) e aquecimento (direita); Aplicações VR (c) abrindo o frigorífico, (d) perto de um fogão; Sensação dinâmica de temperatura em ambiente virtual: (e) ventoinha, (f) calor do sol; Sensação dinâmica de temperatura em vídeo: (g) gotas de água, (h) calor do secador [8]

2.4 Efeito termoelétrico

Conforme dito anteriormente, todos os sistemas hápticos térmicos descritos funcionam com base neste efeito. O efeito termoelétrico num circuito composto por duas junções de dois metais distintos traduz-se numa conversão de uma diferença de temperatura, entre as junções, numa intensidade de corrente elétrica e vice-versa: (efeito Peltier) [10],[11]. O efeito de Peltier é permutável, ao passo que outros fenómenos de geração de calor através da passagem de corrente elétrica não o são, como é o caso do calor gerado por efeito de Joule [11]. Com base no efeito de Peltier, uma junta constituída por dois materiais distintos condutores ou semicondutores, aquece ou arrefece em relação à outra quando percorrida por uma corrente elétrica num circuito fechado, dependendo da direção desta [12]. O esquema de funcionamento está representado na figura 2.5.

O fluxo de calor gerado nas junções é dado pela expressão:

$$\Phi = (\pi_A - \pi_B) * I \quad (1)$$

onde π_A e π_B representam o coeficiente de Peltier do condutor A e B respetivamente, e I a corrente elétrica do circuito. Os coeficientes de Peltier representam a quantidade de calor gerado por unidade de carga. O calor total gerado não é determinado somente pelo efeito Peltier, mas é também influenciado pelo efeito de Joule, que corresponde à energia dissipada neste processo [13].

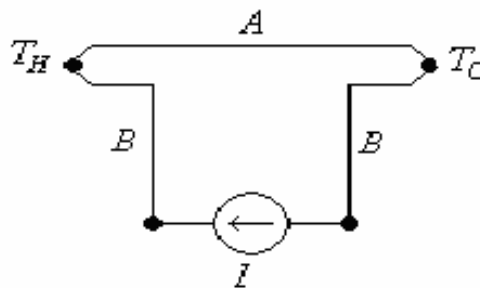


Figura 2.5 - Esquema do efeito de Peltier [22]

Estes dispositivos funcionam de acordo com o efeito de Peltier e são constituídos por dois semicondutores, um tipo-p, outro tipo-n [14]. Nos elementos de Peltier comerciais as “n” junções de elementos semicondutores estão dispostos paralelamente umas às outras, mas ligadas eletricamente em série e colocadas em placas termicamente condutoras. Apesar destes dispositivos terem uma gama de aplicação limitada devido ao facto de apenas conseguirem

dissipar pequenas quantidades calor e terem uma baixa eficiência, são elementos de baixa manutenção, sem vibração nem ruído acústico ou elétrico, portáteis, admitem controlo de temperatura muito rigoroso e têm um ciclo de vida que pode exceder as 100000 horas. É por isso comum o seu uso em desumidificadores e sistemas de arrefecimento portáteis [15]. A figura 2.6 mostra o esquema de funcionamento destes dispositivos.

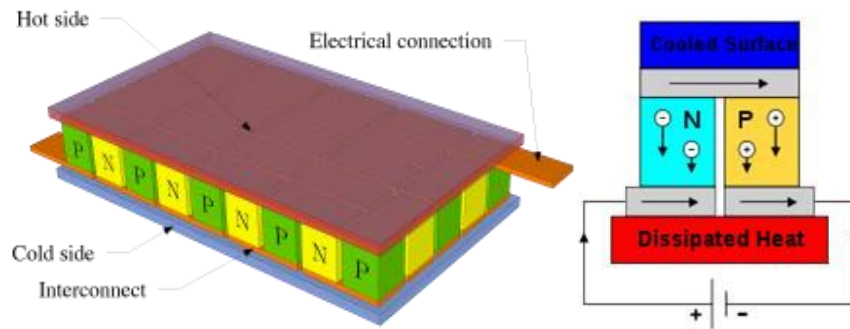


Figura 2.6 - Esquema de construção de um elemento de Peltier [15]

Capítulo 3 - Desenvolvimento e implementação do protótipo

3.1 Arquitetura da solução

Ao longo deste capítulo serão selecionados e descritos em detalhe cada um dos diferentes componentes que integram a solução final. O sistema será constituído por uma fonte de energia que alimenta uma ponte H. A ponte controlará a direção da corrente que passará para o elemento de Peltier. Este terá um sensor próximo que medirá a temperatura e cujo valor será mostrado num display LCD. O set-point do sistema é criado através da interface gráfica (em *Processing*), que envia informação para o *Arduino*, regulando os valores da ponte H e fechando a malha de controlo. A figura 3.1 sugere *a priori* um diagrama funcional da solução proposta.

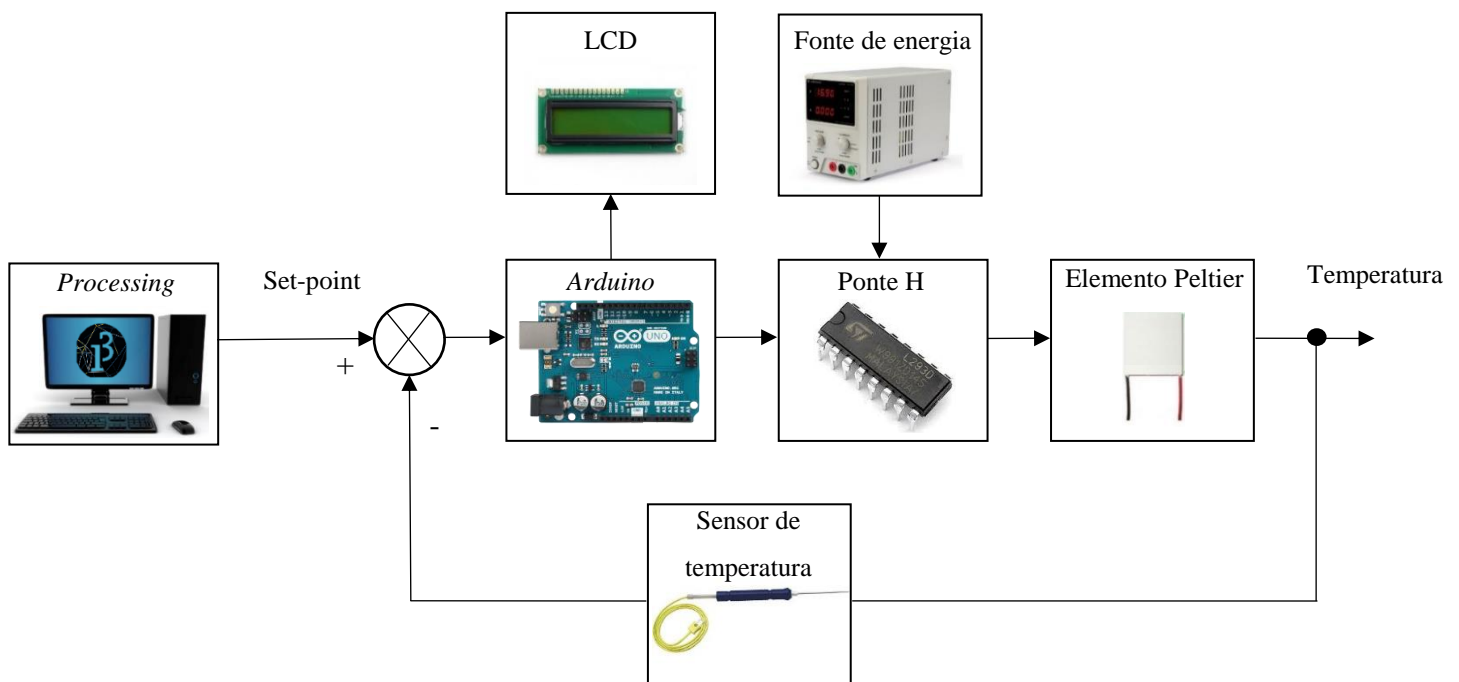


Figura 3.1 - Esquema da arquitetura da solução proposta

Quanto ao tipo de comunicação, vários modos podem ser considerados, porém o mais convencional e lógico para a aplicação em causa será uma comunicação Universal Serial Bus (USB), visto que o dispositivo final é um rato de computador. Tem ainda a vantagem de dispor de corrente para a alimentação do sistema.

3.2 Implementação da ponte H

O controlo da tensão de alimentação do elemento de Peltier (em grandeza e direção) regula a temperatura deste. Este controlo requer uma fonte de energia reversível capaz de fornecer tensões positivas e negativas, de modo a aquecer ou arrefecer o elemento. Sendo que o sistema é alimentado através de uma fonte de tensão unipolar, a utilização de uma ponte H garante que a corrente é aplicada no sentido positivo (b), ou no sentido negativo (c), consoante a posição dos transístores (figura 3.2).

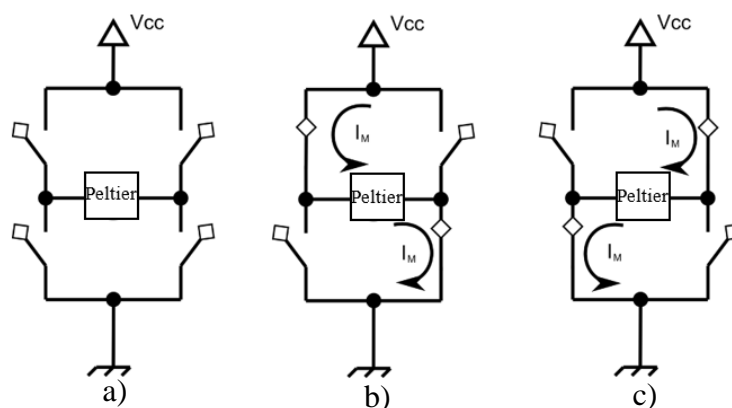


Figura 3.2 – (baseado em [23]) - Esquema de funcionamento de uma ponte H
- a) transístores da ponte em corte, b) alimentação do Peltier com corrente no sentido positivo, c) alimentação do Peltier com corrente no sentido negativo

Neste trabalho foi utilizada uma ponte H, L293D, da ST Microelectronics. Este integrado é uma dupla ponte H, tendo capacidade para 4 entradas, e duas saídas. Neste caso, só é utilizada uma saída ligada ao Peltier, pelo que só metade dos pinos foram utilizados. No entanto é necessário fechar o circuito do lado do circuito integrado (IC) não utilizado para que a ponte funcione corretamente. A figura 3.3 mostra as ligações feitas entre o IC e o elemento de Peltier.

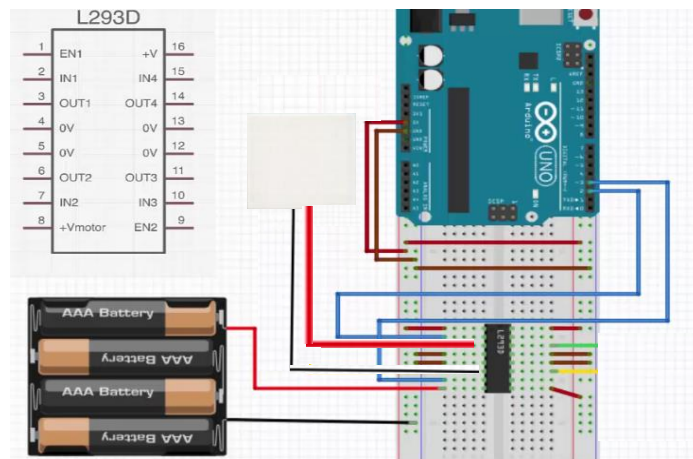


Figura 3.3 - Esquema de montagem entre Arduino e integrado de dupla Ponte H [23]

3.3 Escolha do elemento de Peltier

O elemento de Peltier foi selecionado de modo a que fosse ergonómico e ajustável à situação em estudo. Assim sendo, foi comprado um elemento de dimensões reduzidas, para que o calor fosse percecionado na ponta do indicador do utilizador. O facto de apresentar um tamanho reduzido é também favorável à obtenção de um tempo de resposta mais curto, visto que quanto mais pequeno for o elemento mais pequena será a corrente necessária e, também, menor a sua inércia térmica. Os primeiros testes foram realizados com um elemento de Peltier já existente no laboratório (referência CP1.4-17-045L). A área ativa deste Peltier é de 225 mm², sendo um quadrado de 15 mm de lado. Este Peltier, apesar de funcional, tardava a responder aos valores impostos pela fonte de alimentação.

Assim sendo, recorreu-se a um outro elemento de Peltier quadrado com 16 mm², referência de fabricante ET007-05-15. Apesar de responder mais rapidamente, os valores de tensão e corrente máximos para este Peltier, bem como outros elementos de Peltier destas dimensões, são também eles muito baixos. Além disto, acresce também o facto de que as dimensões excessivamente reduzidas deste Peltier não ajudavam na ergonomia da solução, visto que é difícil para o dedo humano assentar numa área tão pequena.


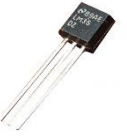

Tendo em conta os parâmetros discutidos, procurou-se então adquirir um Peltier que fosse um bom compromisso entre dimensão/corrente nominal/tempo de resposta, sem descurar como é evidente o seu custo. Foi selecionado o Peltier da RS ET-007-10-15, com uma área ativa de 64 mm² e valores nominais de corrente e tensão bem superiores ao Peltier

de menor dimensão previamente selecionado. Este foi o elemento de Peltier selecionado na solução final desenvolvida e cuja informação pode ser consultada no Anexo A.

3.4 Sensor de temperatura

De modo a medir a temperatura do objeto, deve ser colocado um sensor de temperatura no elemento. Para a escolha deste sensor, foram contemplados 3 diferentes tipos: um termístor, um sensor LM35 e um termopar tipo K. Foram comparados entre eles tendo em conta três diferentes parâmetros: conhecimento da curva característica, as dimensões (de modo a perceber se é uma solução ergonómica para a solução pretendida) e a capacidade de comunicação digital com o *Arduino*. O custo não foi objeto de comparação, uma vez que todos estes apresentam valores muito semelhantes e igualmente acessíveis. A tabela 3.1 apresenta a comparação dos 3 parâmetros de cada um dos 3 sensores.

Tabela 3.1 - Tabela de avaliação dos diferentes sensores de temperatura

Tipo de Sensor	Curva característica conhecida	Ergonómico	Comunicação digital com <i>Arduino</i>
Termístor NTC 	Não	Sim	Não
LM35 	Sim	Não	Não
Termopar tipo K 	Sim	Sim	Sim

O sensor que reúne melhores características para a solução pretendida é o termopar tipo K. A sua sensibilidade é conhecida e aproximadamente linear, sendo ainda uma solução compacta e ergonómica para a finalidade.

No entanto, a principal razão para a escolha deste sensor recai no facto de ser o único que tem a capacidade de comunicar digitalmente com o microcontrolador, com o auxílio de um integrado que possui uma biblioteca dedicada para *Arduino*. Este integrado possibilita a leitura digital direta da temperatura externa, não sendo necessário conexão por porta analógica à placa *Arduino*. Assim sendo, o termopar foi o sensor de temperatura escolhido para integrar o sistema.

Os termopares são transdutores de temperatura simples, robustos e de baixo custo, sendo amplamente utilizados nas mais variadas aplicações de medição de temperatura. Diferentes tipos de termopares possuem diferentes tipos de resposta em função da temperatura [16].

O termopar escolhido foi um termopar do tipo K, constituído por dois materiais, o Cromel (liga de 90% de Níquel e 10% de Crómio) e Alumel (liga de 95% Níquel e 5% de Alumínio). Este é um termopar de uso genérico de baixo custo e com uma vasta gama, que pode abranger temperaturas entre os -200 e os 1200 °C, tendo uma sensibilidade de aproximadamente 40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ [17].

Existem tabelas normalizadas, que fornecem os valores da tensão de saída do termopar considerando que a segunda junção do termopar (junção fria) é mantida a exatamente 0°C, ou em alternativa usando um elemento de leitura com compensação eletrónica de junção fria.

Este circuito integrado tem a capacidade de lidar com a compensação da junção fria. Tipicamente a temperatura desta junção é medida por um termistor de precisão integrado. A leitura desta segunda temperatura, em conjunto com a leitura do valor da tensão do próprio termopar é utilizada para o cálculo da temperatura verificada na extremidade do termopar.

O integrado MAX31855 foi o dispositivo usado para permitir a comunicação entre o termopar tipo K e a placa *Arduino*, assim como a respetiva conversão automática de grandezas. Este integrado possui uma biblioteca para *Arduino*, sendo apenas necessário importá-la para a folha de código, através do comando *#include*.

Esta biblioteca permite a conversão automática dos valores de tensão gerados pelo termopar em temperatura, ambas funções internas desta biblioteca: *thermocouple.readInternal()* e *thermocouple.readCelsius()*, respetivamente. Será assim utilizado como interface de hardware entre o termopar e o *Arduino*.

O integrado apresenta uma resolução de 0.25°C, uma gama de valores dos -270°C aos 1800°C e uma exatidão de $\pm 2^\circ\text{C}$ até aos 700°C e comunicação Serial Peripheral Interface (SPI), existindo versões disponíveis para vários tipos de termopar (K, J, T, N, S, R, E).

A figura 3.4 mostra a configuração dos pinos deste integrado.

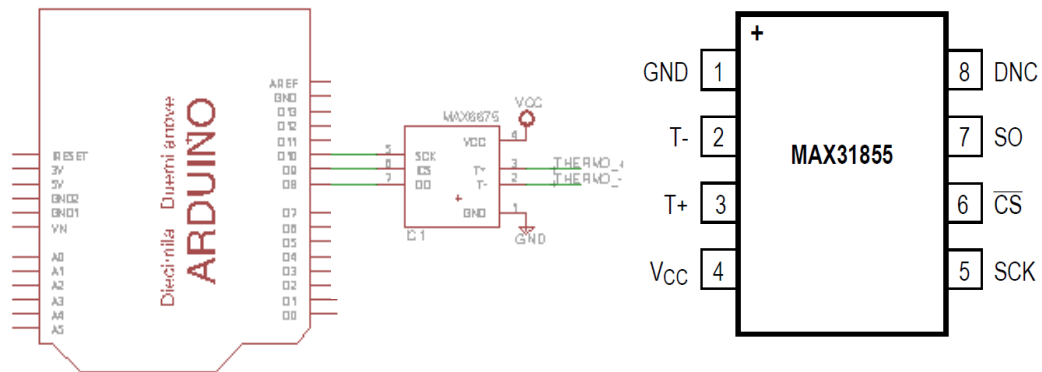


Figura 3.4 - (baseado em [24]) - Configuração de pinos do integrado MAX31855

3.5 Liquid Crystal Display (LCD)

Para obter informação relativa a algumas ações do jogo, foi incluído um Liquid Crystal Display (LCD) no sistema. Para haver este retorno poder-se-ia recorrer à opção *serial monitor* do *Arduino*, que faz com que os valores comunicados pela porta série sejam registados através de uma janela que surge no ecrã. Contudo, dado que a aplicação em *Processing* está a decorrer quando a comunicação é estabelecida, não é de todo confortável alternar entre janelas para verificar valores ou testar o envio/receção de variáveis, pelo que se recorreu a este tipo de display.

O LCD utilizado tem 16 colunas e 2 linhas. Para que seja possível o microcontrolador gerir o LCD foi incluída a biblioteca “LiquidCrystal”, bem como definidos alguns dos pinos do LCD na declaração de variáveis, sendo estes o *Register Select*, o *Enable* e 4 pinos de *Registers*. De notar que foi iniciado o LCD no setup do programa definindo a sua dimensão, através do comando (`lcd.begin(16,2)`). Através do comando `lcd.print()` é possível enviar as variáveis pretendidas para o display. Um potenciómetro pode ser utilizado juntamente com o LCD para definir o brilho do display, sendo o mais comum acertar o brilho para a posição pretendida e ligar o respetivo pino ao *ground* (pino 3) de modo a dispensar o uso futuro do potenciómetro. Os 4 pinos de *Register* (pinos 11 a 14) são ligados às portas digitais do *Arduino*, assim como o pino de *Register Select* e de *Enable*.

As configurações dos pinos e ligações ao *Arduino* estão disponíveis na figura 3.5.

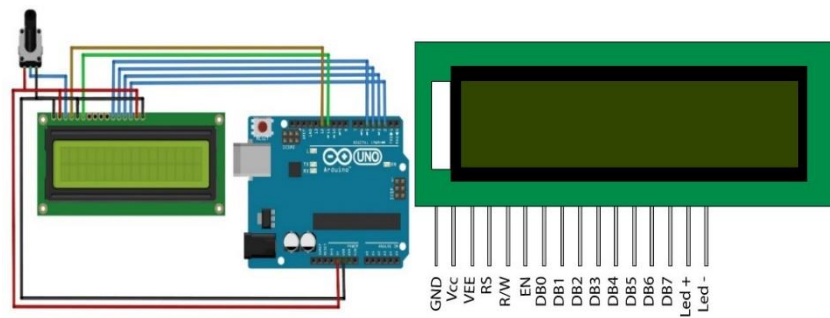


Figura 3.5 - Configuração de pinos do LCD e ligação à placa Arduino [25]

3.6 Controlador de temperatura

Para um controlo de temperatura preciso, deve recorrer-se a um controlo em malha fechada pois este, ao contrário do controlo em malha aberta, mede constantemente a temperatura de saída para efetuar correções nos valores de entrada, de modo reduzir o erro na saída. Para tal, um sensor de temperatura monitoriza a superfície do módulo de Peltier enviando a medida de temperatura que, sendo comparada com a temperatura de referência, gera o sinal de erro. Este sinal é processado no *Arduino*, fechando assim a malha de controlo.

O algoritmo de controlo será implementado num microcontrolador *Arduino UNO*, visto que o uso de um controlador PID industrial apresentaria um custo muito elevado e dimensões pouco apropriadas para o caso de estudo. O Arduino recorre a uma linguagem própria, denominada *Arduino IDE*. Existem no entanto outros tipos de microcontroladores mais universais e com uma linguagem não tão restrita, mas mais avançada, como o microcontrolador *mbed*, por exemplo, que recorre a C++ como linguagem de programação [18].

Devido à grande inércia térmica, o sensor de temperatura demora uns segundos a responder às mudanças do elemento termoelétrico (TEC). Um controlador PID é o mais usado para este tipo de controlo de temperatura associada a um elemento de Peltier, sendo assim possível aumentar a perceção do erro e antecipar melhor a resposta, com a inclusão dos parâmetros proporcional e derivativo [19].

Um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) consiste num tipo de controlo que abrange três parâmetros: as ações proporcional integral e derivativa, fazendo assim com

que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, eliminado pela ação integral e antecipado pela ação derivativa. Resulta de um controlo em malha fechada, alterando a cada incremento de tempo as variáveis de entrada através do feedback do erro recebido por um sensor de temperatura colocado na saída do sistema.

Sendo definido o ponto de estabilização do sistema (neste caso corresponderá a uma temperatura), é possível definir o erro para cada instante como sendo a diferença entre a saída do sistema e esse set-point. A cada incremento temporal, os valores da entrada são ajustados em função da saída, minimizando o erro a cada iteração. Cada um dos parâmetros do PID, “ K_p ”, “ K_i ” e “ K_d ”, relaciona-se com o erro, embora de forma diferente, através de uma expressão geral que rege este tipo de controladores, equação 2

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

sendo que “ K_p ”, “ K_i ” e “ K_d ” representam respetivamente o ganho proporcional, integral e derivativo, “ e ” o erro do sistema, “ t ” o tempo decorrido, $u(t)$ a saída do sistema e “ τ ” o tempo de integração.

Os ganhos do sistema têm que ser ajustados de modo a garantir um correto funcionamento do mesmo.

Outro tipo de controlo utilizado foi a modulação por largura de pulso (Pulse Width Modulation - PWM). Este é usado para criar uma onda quadrada, ou seja, um sinal que alterna o seu estado entre *ON* e *OFF*. Este padrão pode simular tensões entre o máximo (5 V) e o mínimo (0 V), alternando o intervalo de tempo em que o sinal se encontra em 5V e em 0V. A duração do tempo na tensão máxima de 5 Volt é chamada largura de pulso (Pulse Width). Para obter diferentes valores analógicos, altera-se a largura de pulso.

Na figura 3.6, as linhas verdes representam um período de tempo regular, que é o inverso da frequência do PWM (500 Hz). O comando *analogWrite()* encontra-se pré-definido com uma resolução de 8 bits, o que resulta numa escala de valores de 0 a 255, de modo a que *analogWrite(255)* crie um ciclo de trabalho de 100% e *analogWrite(127)* um ciclo de trabalho de 50% [20].

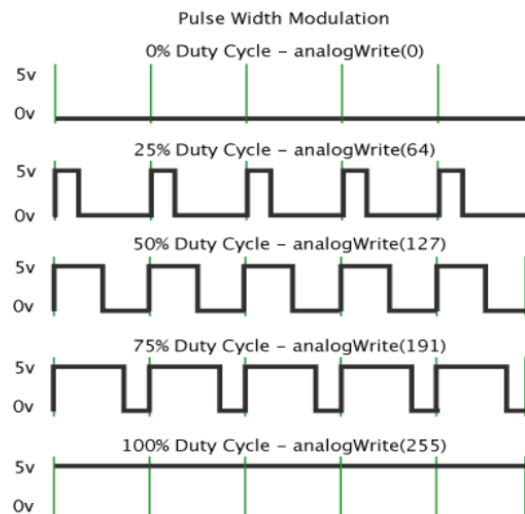


Figura 3.6 - Duty cycle PWM [20]

Tendo em conta a utilização em vista, o controlo de temperatura poderá não exigir um rigor elevado como o que um controlador PID permite obter, visto que um diferencial de temperatura de 2 ou 3°C não será facilmente percecionado pelo utilizador. A isto acresce o facto de que o controlo PID de temperatura requer a existência de um sensor de temperatura próximo da face do Peltier, de modo a servir como temperatura de feedback do sistema. Tendo em conta a área superficial reduzida do Peltier, não será de todo conveniente ter um sensor adjacente, pois o utilizador iria estar a colocar o seu dedo em cima do sensor, em vez de o posicionar diretamente em cima do Peltier.

Assim, optou-se por utilizar o termopar tipo K para caracterizar o Peltier, recorrendo à função *map()*. O intervalo de temperaturas definido para o funcionamento do elemento de Peltier será de [0°C,50°C].

Neste caso, as entradas Input 1 e Input 2 da ponte H são controladas através da variação PWM.

Para que tal aconteça, é necessário garantir que estas duas entradas sejam ligadas a portas da placa *Arduino* que disponham deste tipo de modulação. Para que se obtenha a melhor resolução será necessário mapear os valores do PWM para os diferentes valores de temperatura de modo a que quando a entrada 1 estiver no seu máximo valor analógico (255), a entrada 2 estará no seu mínimo (0), e o elemento de Peltier estará no máximo valor de temperatura que se pré-definiu (50°C). Por oposição, se a primeira entrada possuir o valor analógico nulo e a segunda o máximo, o Peltier deverá estar à mínima temperatura de 0°C.

Os restantes valores de temperatura serão combinações dos valores das duas entradas, tendo estes que ser devidamente caracterizados de forma a corresponderem às temperaturas desejadas.

3.7 Interface gráfica

A interface gráfica foi desenvolvida em *Processing*. É uma linguagem orientada para animações e aplicações visuais, que surge primeiramente para artistas e *designers*, permitindo ao programador desenhar as suas ideias em código, através de uma linguagem de programação baseada em *Java*® [21].

Para a prova de conceito, foi desenvolvido um jogo simples que divide o ecrã em vários quadrados. Gera-se aleatoriamente uma bola por baixo de um desses quadrados. O objetivo passa por acertar em qual dos quadrados estará situada essa bola, sendo que se sentirá o Peltier a aquecer pela aproximação desse quadrado e a arrefecer quando se afasta deste.

Inicialmente, o jogo foi codificado de modo a que a temperatura também tivesse um feedback visual, sendo que à medida que o rato se aproximasse da bola, o fundo ia ficando mais vermelho. À medida que se afastasse, ficava mais azulado. Tal característica pode revelar-se interessante para criar mais envolvimento com o utilizador, no entanto, tendo recurso a este apoio visual, torna-se muito mais fácil perceber onde será a área de maior ou menor temperatura, descurando o propósito do jogo e do projeto, que consiste em perceber variações de temperatura somente de forma tátil.

O número de quadrados pode ser alterado, ficando a tela do ecrã mais ou menos dividida. Os vários quadrados são definidos por dois vetores: um vetor cuja dimensão corresponde ao número de quadrados que se pretende na coordenada x e outro em y . Através da função *random()* são criadas duas variáveis (a e b), que correspondem ao índice do quadrado (x,y) , onde a bola será gerada.

O jogador tem que pressionar o botão do rato no quadrado onde a bola se encontra. Existe um indicador de tempo, obtido através da função *millis()*, que mostra o tempo que o utilizador leva a completar o exercício. Está também sujeito a um número limitado de tentativas para aumentar a concentração do utente. A figura 3.7 mostra o layout apresentado quando o jogo se inicia.

Neste caso foi selecionada uma grelha de 5 por 3, isto é, a dimensão do vetor referente ao número de quadrículas no eixo x será 5, sendo um vetor de dimensão 3 no eixo y .

Quando o jogador acerta na quadrícula que possui a bola, surge um texto que confirma e felicita o jogador por ter acertado, sendo a bola pela primeira vez revelada. Na figura 3.7 é possível também ver a tela que surge no ecrã quando o jogador adivinha corretamente o quadrado que esconde a bola. Neste caso, a função *random()* gerou os valores de $a = 4$ e $b = 1$ e portanto a bola encontrava-se na quadrícula de índice (4,1), ou seja, 4ª quadrícula no eixo x e 1ª no eixo y .

Para rastrear a posição do rato recorre-se às funções *mouseX* e *mouseY*, que fornecem a cada instante a informação atualizada da sua posição em ambas as coordenadas. De modo a saber-se se o utilizador pressionou na quadrícula correta que oculta a bola recorre-se à função *sqrt()*, função da raiz quadrada, permitindo saber a distância do centro da bola gerada à posição onde o rato se encontra em cada instante.

Se ao carregar no botão esquerdo do rato esta distância estiver contida dentro das dimensões da quadrícula pretendida, a função booleana *ganhou()* retorna o valor verdadeiro. Caso contrário, o valor retornado é falso e o número de tentativas diminui.

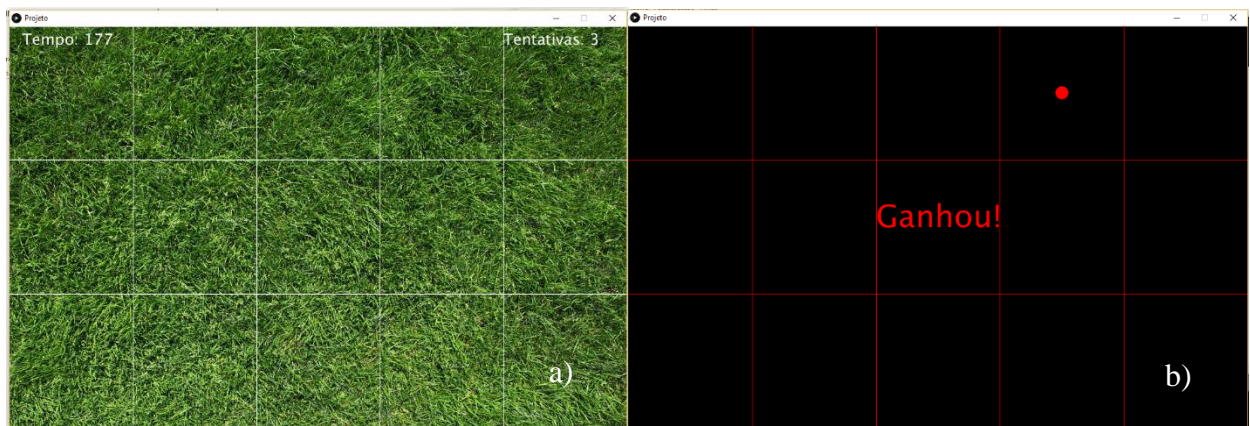


Figura 3.7 – a) Setup inicial do jogo; b) Tela quando jogador acerta na quadrícula que contém o objeto

A ligação do *Arduino* com o computador é feita por uma porta série, sendo necessário configurar valores relativos ao protocolo de comunicação, como a porta “COM” e a taxa de transmissão de dados (*baud rate*). O valor da *baud rate* é definido na programação do *Arduino* com o comando *Serial.begin (baud rate pretendido)*. Foi selecionado o valor de 9600 bits/s, que é o mais usual. No *Processing*, a porta COM e o *baud rate* têm de ser configurados de modo a igualar os utilizados pelo *Arduino*, para que se estabeleça a comunicação, de modo

a que o *Arduino* saiba qual a posição do rato e, conforme a mesma, decidir a ação de aquecimento ou de arrefecimento do elemento de Peltier para a temperatura desejada.

O jogo foi projetado de modo a que o gradiente de temperatura na vertical fosse nulo, a não ser que o rato estivesse no índice x onde é gerada a bola. Ou seja, a temperatura varia somente com o eixo x , exceto na coluna onde a bola existe. Conforme referido anteriormente, a temperatura máxima foi limitada a 50°C, correspondente ao quadrado que contém o objeto. Tomando como referência a figura 3.7, esta posição corresponderia à quadrícula de índice (4,1). Nesse mesmo índice x , ou seja, nos quadrados (4,2) e (4,3), a temperatura a ser percecionada será de 45°C.

Nos restantes quadrados, a temperatura depende apenas do índice x , diminuindo quanto maior for a distância do índice x ao objeto. De notar que a gama de temperaturas só pode tomar valores discretos consoante as diferentes quadrículas. Considerando o exemplo anterior de uma grelha de 5 por 3, os únicos valores possíveis serão {0°C, 15°C, 30°C, 45°C, 50°C}. Assim sendo, há valores de temperatura de diferentes colunas que por vezes se repetem, ou em certos casos nem todos os valores da gama chegam a ser utilizados. A figura 3.8 mostra o exemplo aqui descrito com os valores de temperatura referentes a cada índice de quadrícula.

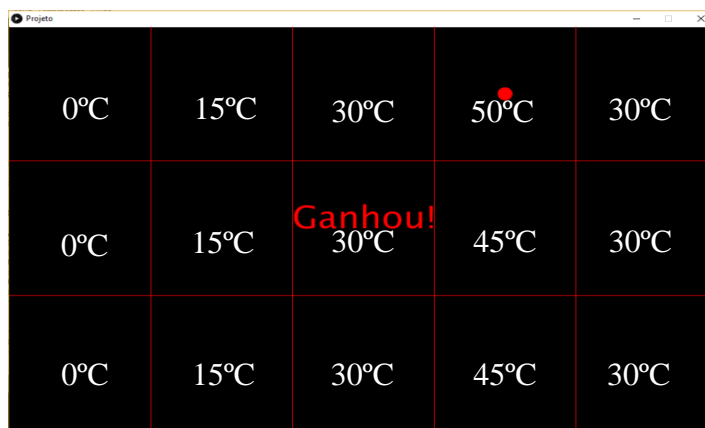


Figura 3.8 - Distribuição das diferentes temperaturas projetadas ao longo da tela

É então necessário estabelecer a comunicação, de modo a que se consiga registar todas estas variáveis criadas em *Processing* e enviá-las para o *Arduino* para que este as possa interpretar.

O primeiro passo foi importar a biblioteca de comunicação série do *Processing* e implementá-la na folha de código. Foi ainda necessário definir a variável de comunicação

série, através do comando *Serial* (ex.: *Serial myPort*). Consoante o valor absoluto da distância entre a posição do rato e o objeto escondido, é possível definir a cada instante a quadrícula onde o rato se encontra. Através do comando *myPort.write()*, é possível associar um carácter à temperatura desejada nessa quadrícula, enviando tal carácter para o *Arduino*. A figura 3.9 demonstra essa secção do código.

Apesar dos valores terem sido enviados pela comunicação série, o *Arduino* não é ainda capaz de os interpretar. Para que seja possível ao *Arduino* receber esses caracteres, é criada uma variável de estado do tipo carácter (*char*) e igualá-la ao comando *Serial.read()*, para que a variável de estado fique com o carácter recebido do *Processing*, fechando o processo de comunicação. Assim, o *Arduino* está em condições de manipular as entradas da ponte H, de modo a simular a temperatura desejada no elemento de Peltier, para cada diferente carácter recebido.

```
void mouseMoved()
{
    dist = sqrt((divisorx[a]-mouseX)*(divisorx[a]-mouseX)+(divisory[b]-mouseY)*(divisory[b]-mouseY));
    //temp = 40.0f-(40.0f/distmax)*dist;
    //pwm = temp*255.0f/40.0f;

    if (abs(divisorx[a]-mouseX)<width/(2*numdelinhasx) && abs(divisory[b]-mouseY)<height/(2*numdelinhasy)){
        temp = 50;
        myPort.write('4');
    }
    if (abs(divisorx[a]-mouseX)<width/(2*numdelinhasx)&& abs(divisory[b]-mouseY)>height/(2*numdelinhasy)){
        temp = 45;
        myPort.write('3');
    }
    if (abs(divisorx[a]-mouseX)>width/(2*numdelinhasx)){
        temp = 30;
        myPort.write('2');
    }
    if (abs(divisorx[a]-mouseX)>3*width/(2*numdelinhasx)){
        temp = 15;
        myPort.write('1');
    }
    if (abs(divisorx[a]-mouseX)>5*width/(2*numdelinhasx)){
        temp = 0;
        myPort.write('0');
    }
}
```

Figura 3.9 - Comunicação Processing/Arduino, envio de caracteres consoante posição do rato

Quando testado o primeiro modelo de interface, concluiu-se que na prática era difícil alternar entre valores de temperatura próximos uns dos outros com a rapidez e eficácia desejada, visto que o tempo de resposta do elemento de Peltier se faz “sentir” em cada transição de valores de temperatura requeridos. Assim, tentando minimizar o efeito da constante de tempo térmica, foi criada uma interface que solicitasse apenas dois valores de temperatura bastantes distintos, dando a sensação distinta de somente calor ou frio. Para isso foi criado um jogo simples onde seria seleccionada aleatoriamente uma de várias imagens disponíveis, sendo que metade delas remetiam para sensações de calor (por exemplo uma

lâmpada ou uma fogueira), e outra metade para sensações de frio (um gelado, cubos de gelo, etc.).

As imagens surgem num determinado ponto do ecrã e movem-se segundo um dado vetor, ambos aleatórios. Cabe ao utilizador pressionar nas imagens e arrastá-las para a parte superior do ecrã, para a zona que indica “frio” ou para a que indica “quente”, consoante o que estiver a sentir através do estímulo fornecido pelo elemento de Peltier. Depois de largar o rato nessa zona, uma nova imagem é gerada, repetindo-se o processo.

Este jogo seria dedicado a pessoas que precisem de treinar a destreza na movimentação fina da mão, com o feedback de temperatura.

A figura 3.10 demonstra o layout da interface criada.

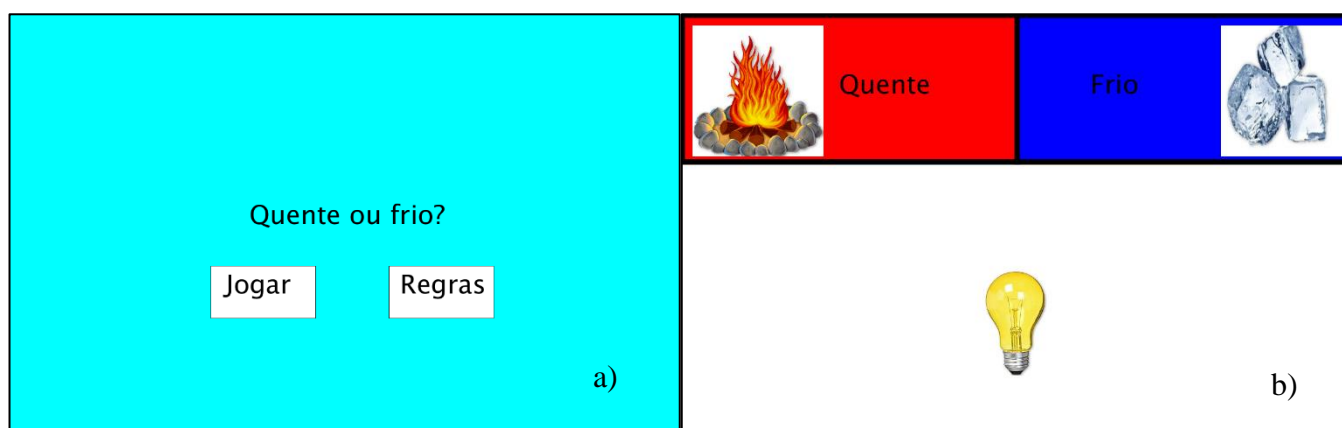


Figura 3.10 – a) Setup inicial do jogo; b) Ecrã ao escolher a opção “Jogar”

O tipo de comunicação e os comandos utilizados para envio e receção de informação entre os dois softwares foi semelhante ao utilizado na primeira interface gráfica.

No entanto, desta feita não é necessário o envio e leitura de 5 caracteres distintos, visto só existirem dois valores de temperatura; um correspondente ao “quente” e outro ao “frio”, bastando retornar um “0” ou “1”, consoante o caso.

De modo a que o *Processing* saiba se a imagem aleatoriamente gerada deve enviar um “0” ou um “1” ao *Arduino*, criou-se uma biblioteca de imagens onde as imagens que remetiam para a sensação de frio foram gravadas com o nome “img” seguido de um número ímpar. O mesmo se fez nas imagens que remetiam para sensações de calor, mas com números pares. O nome do ficheiro tem que estar em concordância com a parte inteira do número real aleatório gerado, para que o programa selecione a imagem e a represente corretamente.

Se a parte inteira desse número aleatório correspondente ao nome do ficheiro for divisível por 2, então o número é par, a imagem remeterá para a sensação de calor, sendo dada informação de aquecimento ao sistema de alimentação do Peltier. Se o número não for divisível por 2, será dada ordem de arrefecimento ao sistema. A figura 3.11 mostra uma das partes do código que estabeleceu esta comunicação.

```
float a = random(1,7);  
int imgNumber = int(a);  
img=loadImage("img"+imgNumber+".jpg");  
if (imgNumber%2==0){  
  myPort.write('0');  
}  
else{  
  myPort.write('1');  
}
```

Figura 3.11 - Comunicação Processing/Arduino, envio de caracteres consoante paridade do número gerado

Capítulo 4 - Validação experimental

O elemento de Peltier selecionado (ver Anexo A) foi testado e caracterizado quanto à sua resposta.

De modo a verificar alguns dos pressupostos assumidos no capítulo 3.2 para a escolha do elemento de Peltier, este foi comparado com o TEC12705, de 40x40 mm. Este é um elemento muito mais robusto e de área superficial muito maior, tendo sido submetido aos mesmos testes do Peltier previamente selecionado, de modo a comparar ambas as respostas.

Para levar a cabo esta validação, posicionou-se o termopar tipo K na superfície dos elementos de Peltier e, com recurso ao integrado MAX31855 que comunica diretamente com a placa *Arduino*, registaram-se os valores de temperatura ao longo de um intervalo de tempo de 50 segundos para aquecimento e arrefecimento em diferentes condições.

Usando o programa de comunicação, denominado TeraTerm, registaram-se os valores de tempo e de temperatura correspondente.

Foi assim possível exportar a informação para um ficheiro Excel e criar gráficos para melhor perceção do comportamento dos elementos de Peltier e respetivo controlo.

Para a observação de temperaturas atingidas e rapidez de resposta, foram selecionados 3 pontos distintos da gama de funcionamento para cada elemento de Peltier, comparando os três pontos entre eles. Os elementos foram atuados em fonte de corrente.

4.1 Elemento de Peltier 8x8

4.1.1 Aquecimento

O primeiro teste conduzido foi relativo ao aquecimento do elemento de Peltier de menores dimensões (Anexo A).

Apesar deste elemento indicar valores máximos de intensidade de 3A e 0,9V de tensão máxima permitida, observou-se que a queda de tensão era de 0,9V para uma corrente de 1,5A, passando a ser esta a máxima corrente admissível para o elemento. Verifica-se que quanto maior a corrente consumida pelo elemento, maior a temperatura atingida, podendo esta atingir os 130°C em 50 segundos, quando alimentado a 1,5A.

Quanto aos gráficos de aquecimento, estes foram conseguidos normalizando os valores de temperatura entre o mínimo (que corresponderá à temperatura ambiente visto estarmos a aquecer o elemento), e um limite que se convencionou nos 50°C. Tal resulta num rácio de temperatura entre valores relativos de 0 (mínimo) e 1 (máximo), que é facilmente calculada com recurso à equação 3,

$$\text{Rácio de Temperatura} = \frac{|T - T_{\min}|}{|T_{\max} - T_{\min}|} \quad (3)$$

onde “T” é a temperatura medida num dado instante, “T_{máx}” a temperatura máxima admitida (que se fixou nos 50°C) e “T_{min}” a mínima temperatura registada que, tratando-se de um aquecimento, corresponde à temperatura ambiente.

Confirma-se então que para uma corrente de 1,5A, a taxa de aquecimento é maior, atingindo 50% da temperatura máxima em apenas 2 segundos e atingindo os 100% (50°C) em apenas 4,5 segundos. A figura 4.1 apresenta os resultados obtidos para os diferentes valores da fonte de alimentação.

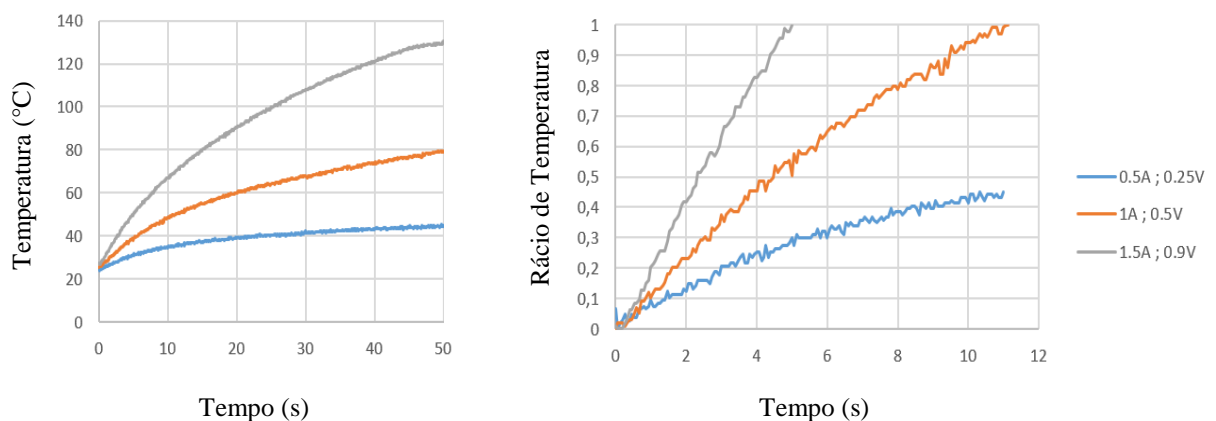


Figura 4.1 - Temperatura e taxa de aquecimento, Peltier 8x8

4.1.2 Arrefecimento

No arrefecimento, os mesmos valores de corrente foram gerados na fonte de alimentação e aplicados ao Peltier, visto que os valores de arrefecimento e aquecimento máximo têm que ser iguais, para que possam depois ser controlados sem ser necessário intervenção manual.

Tal como acontecia no aquecimento, quanto maior a corrente imposta, maior a taxa de arrefecimento e maior a diferença de temperaturas atingida. Neste caso, visto estar-se a arrefecer o elemento, menores serão as temperaturas atingidas. No entanto, ao fim de poucos segundos verifica-se que para um determinado valor de corrente a temperatura começa a aumentar. Tal acontece pois quanto maior a corrente que atravessa o dispositivo, maior a potência calorífica gerada e o elemento de Peltier não consegue remover eficazmente esse calor ao mesmo ritmo a que é produzido. É necessário recorrer a elementos externos, através de um conjunto de dissipador e ventoinha.

Observa-se que após adicionar este conjunto ao sistema, quando alimentado a 0,5A o seu comportamento não se altera pois o calor gerado é pequeno o suficiente para ser dissipado pelo ar ambiente, sem recurso a meios externos. Quando alimentado a 1A, o sistema atinge uma temperatura de equilíbrio na ordem dos 6°C. Com 1,5A, o Peltier chega a ter um mínimo para 4,75°C, mas este valor não é mantido, sendo que a sua temperatura vai aos poucos aquecendo, atingindo os 6°C ao fim dos 50 segundos. Para evitar este aquecimento, embora lento, seria necessário possuir um conjunto de ventoinha e dissipador com mais potência, passando o sistema a ser de maiores dimensões. As figuras 4.2 e 4.3 demonstram a diferença de comportamento sem remoção e com remoção de calor, respetivamente.

De forma análoga ao aquecimento, recorreu-se também à equação 3 para se registar os valores da taxa de arrefecimento. De notar que neste caso a variável “ $T_{\text{máx}}$ ” corresponderá à temperatura ambiente e “ T_{min} ” ao valor mais baixo registado, ou seja, máximo arrefecimento.

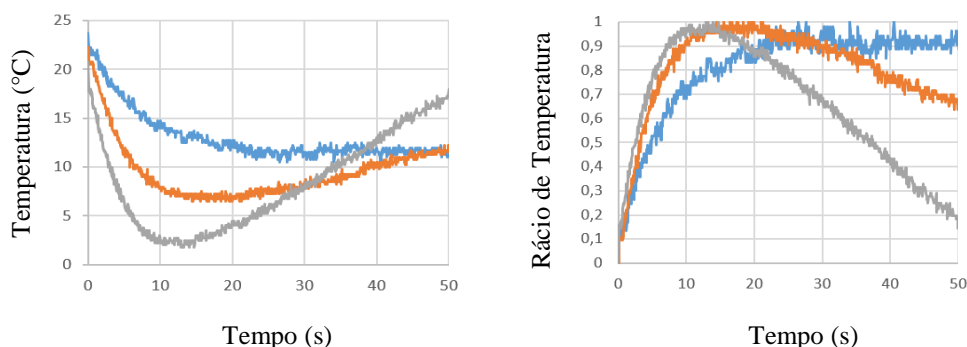


Figura 4.2 - Temperatura e taxa de arrefecimento sem remoção de calor, Peltier 8x8

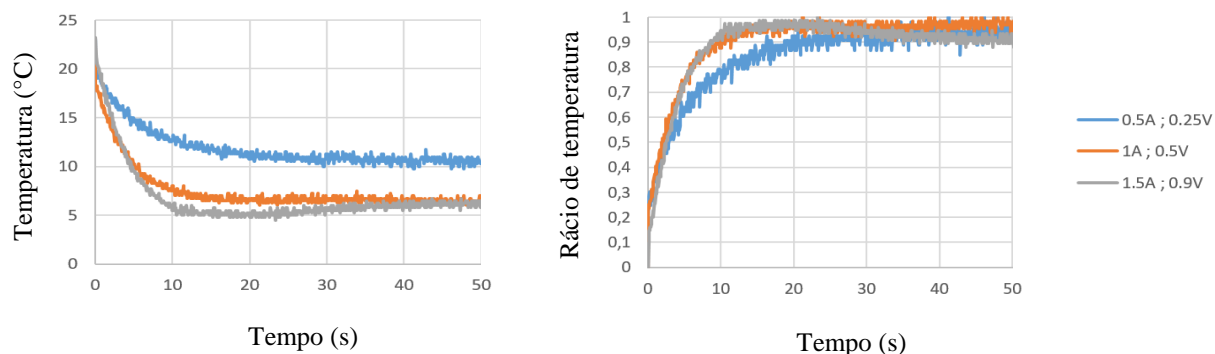


Figura 4.3 - Temperatura e taxa de arrefecimento com remoção de calor, Peltier 8x8

4.2 Elemento de Peltier 40x40

4.2.1 Aquecimento

Os mesmos testes foram aplicados ao elemento de maiores dimensões, também para 3 valores distintos de intensidade de corrente e com o estudo da taxa de aquecimento a fixar-se no mesmo valor limite (50°C).

Verificou-se que, a taxa de aquecimento deste elemento é até superior ao elemento de 8x8 mm, visto atingir os 100% em apenas 3,6 segundos, quando alimentado por uma corrente de 3,5A. Para uma corrente de 2,4A também obtemos um tempo de resposta bastante satisfatório, atingindo os 100% em 5 segundos.

Tal como acontecia no outro elemento, aqui também é possível verificar que quanto maior a corrente fornecida, maior a velocidade de resposta. A figura 4.4 mostra as temperaturas atingidas e a velocidade de aquecimento dos 0 aos 50 segundos.

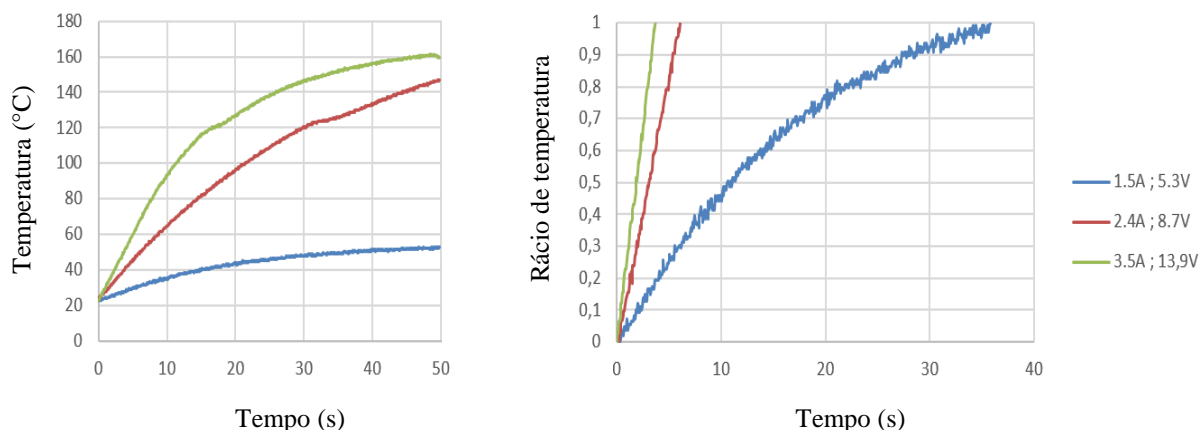


Figura 4.4 - Temperatura e taxa de aquecimento, Peltier 40x40

4.2.2 Arrefecimento

No arrefecimento, concluiu-se que este elemento de Peltier produzia demasiada energia, sendo que só foi possível a sua remoção com algum êxito com auxílio de um conjunto de ventoinha e dissipador de uma unidade central de processamento (CPU), de proporções muito elevadas.

De notar no entanto que, mesmo com recurso a este sistema de arrefecimento robusto, para um valor de 3,5A este sistema não conseguia remover o calor gerado pelo elemento, aumentando rapidamente a sua temperatura ao fim de poucos segundos. Assim sendo, esta hipótese teve que ser descartada.

Para os outros valores de corrente, as temperaturas negativas foram atingidas. Para uma intensidade de corrente de 2,4A tem-se uma resposta bastante satisfatória, visto que a taxa de arrefecimento é semelhante à obtida com 3,5A, sendo que esta consegue conservar uma temperatura bastante baixa (cerca de 1°C negativo), ao longo do período de teste.

Este elemento, quando alimentado com 2,4A, consegue atingir temperaturas negativas de 3°C, tendo maior capacidade de gerar frio do que o elemento de Peltier mais pequeno.

A figura 4.5 mostra as temperaturas atingidas e velocidade de arrefecimento para as diferentes condições.

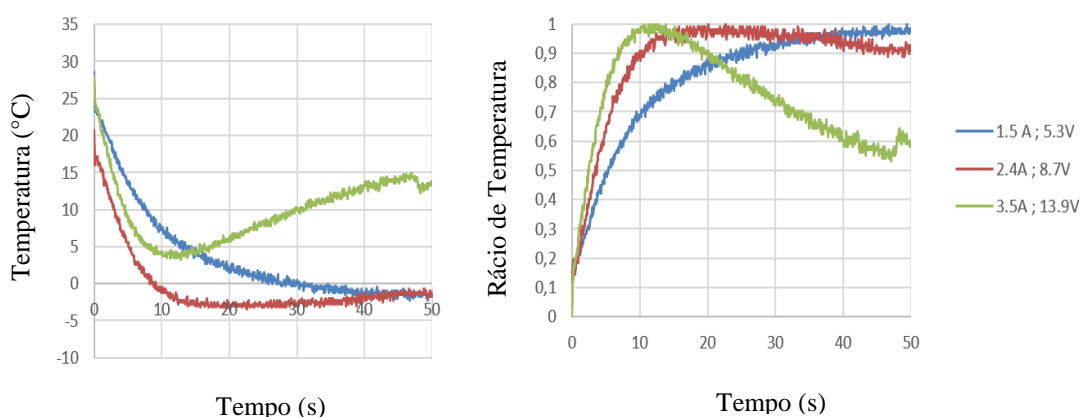


Figura 4.5 - Temperatura e taxa de arrefecimento com remoção de calor, Peltier 40x40

4.3 Escolha final do elemento de Peltier e condições de funcionamento

Apesar do elemento de Peltier de maiores dimensões (40x40 mm) possuir uma resposta mais rápida e maior gama de temperaturas (chegando mesmo a atingir os 3°C

negativos), é necessário um sistema de arrefecimento (dissipador e ventoinha) de dimensões exageradamente grandes, comprometendo a portabilidade da solução e pondo definitivamente de parte a eventual incorporação num rato de computador. Além disso, acresce o facto de que a ponte H não admite valores de corrente que cubram toda a gama de valores deste Peltier.

Posto isto, a decisão recaiu no elemento de Peltier de 8x8 mm e o controlo de temperaturas foi levado a cabo somente com este componente. Este elemento de Peltier é ligeiramente mais lento que o de maiores dimensões, se bem que este último é alimentado por uma corrente consideravelmente superior, o que também levanta a questão da remoção de calor gerado. No arrefecimento este atinge apenas os 6°C, não sendo porém problemático pois é uma temperatura que se percebe inconfundivelmente como sendo fria pelo tato humano.

Selecionando o elemento de Peltier de 8x8 mm, verifica-se que a sua resposta é mais célere quando alimentado com 1,5A. No entanto, como referido anteriormente, constata-se também, através da figura 4.3, que a sua temperatura não estabiliza, existindo um aquecimento, ainda que lento. A isto acresce o facto de que, para 1,5A, o sistema já não funciona em fonte de corrente, comutando para fonte de tensão, sendo o seu controlo muito mais instável.

Assim sendo, optou-se por alimentar o elemento de Peltier com uma corrente de 1A. Apesar do tempo de resposta na fase de aquecimento ser ligeiramente mais lento do que para 1,5A, atinge 50% do seu valor limite em apenas 4 segundos, pelo que é rápido o suficiente para ser percebido pelo utilizador.

No arrefecimento o tempo de resposta para 1A e 1,5A é praticamente igual e as temperaturas atingidas são muito semelhantes (diferença de apenas 1°C), sendo mais proveitoso a alimentação a 1A, visto controlar-se melhor a sua temperatura de equilíbrio.

4.4 Controlo do elemento de Peltier

Selecionado o elemento de Peltier e os valores nominais de funcionamento, é necessário controlar o mesmo para que este não aqueça ou arrefeça em demasia, de modo a não causar desconforto para o utilizador, ou criar situações de perigo. Para as condições selecionadas, verifica-se que o elemento não necessita de controlo na fase de arrefecimento, visto que estabiliza aos 6°C, que é uma temperatura bastante confortável para o toque humano. Definiu-se 45°C como o valor máximo da temperatura de controlo do elemento de Peltier.

Foram implementados três tipos de controlo, todos eles por software através do *Arduino*: controlo ON/OFF de temperatura, controlo por PID e controlo por tempo de resposta. Nesta secção analisam-se os três tipos de controlo, tendo em conta as vantagens e desvantagens de cada um.

4.4.1 Controlo ON/OFF de temperatura

Este foi o primeiro tipo de controlo utilizado no sistema. Consiste, como o próprio nome indica, em ligar ou desligar o elemento de Peltier para dois valores distintos, mas próximos entre si e próximos também do valor limite pretendido (45°C).

Foi testada esta hipótese para dois pares de valores: primeiro, ligando o Peltier quando a temperatura fosse maior que 42°C e desligando quando fosse maior que 44°C; segundo, por raciocínio análogo mas com os valores de 44°C e 44,5°C. Assim, para cada caso, obtém-se um sistema de controlo que abrange dois set-points que formam a *deadband* do sistema. Confirmou-se que, apesar de à partida ser expectável um controlo mais rigoroso na segunda hipótese, ambas as soluções apresentavam valores de temperatura que oscilavam entre os valores de 40°C e 45°C, pois a inércia térmica do sistema é grande o suficiente de modo a tornar este tipo de controlo pouco célere.

Apesar de não apresentar uma temperatura de estabilização bem definida, visto tratar-se de um controlo ON/OFF, é uma solução satisfatória na medida em que a temperatura fica condicionada entre os 40°C e os 45°C, cumprindo o maior requisito do sistema (segurança para o utilizador).

A figura 4.6 apresenta este controlo relativo aos dois pares de temperaturas discutidos. De salientar ainda que, apesar de ambos os casos possuírem o mesmo intervalo de valores de oscilação, o segundo caso apresenta-se muito mais instável, dado que o sistema comuta de estado com uma frequência muito maior, uma vez que o intervalo de temperaturas pré-definido é muito mais curto.

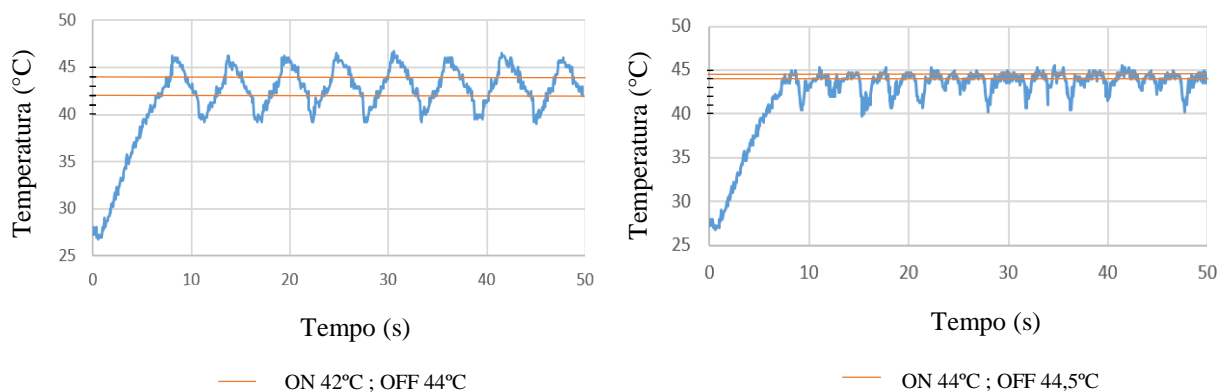


Figura 4.6 - Controlo ON/OFF de temperatura para dois pares de valores distintos

4.4.2 Controlador PID

Um controlador PID foi também testado como possível solução de controlo deste sistema, sendo que o seu princípio de funcionamento e transposição para software foram já discutidos na secção 3.6.

Foram testados também 3 parâmetros diferentes, o PID com ação unicamente proporcional (P), seguido das ações proporcional e integral (PI) e finalmente com o conjunto das três ações de controlo, proporcional integral e derivativa (PID).

A figura 4.7 apresenta os resultados deste tipo de controlo. Como seria expectável, a ação proporcional minimiza o erro e alcança valores muito próximos do pretendido, porém este set-point (45°C) nunca é atingido, fazendo com que o sistema estabilize a uma temperatura ligeiramente inferior. Isto mais uma vez não constitui um problema, pois uma diferença de 2°C não é relevante neste caso. Como esperado também, a ação integral diminui o erro entre temperatura de estabilização e set-point, fazendo com que o sistema atinga a posição de equilíbrio a 45°C. A ação integral introduz um pico no sistema (overshoot) que é eliminado após a introdução da ação derivativa.

Este sistema foi, de todos os testados, o que revela ter maior precisão a alcançar o set-point definido, conseguindo minimizar o erro do sistema.

No entanto, convém referir que tanto este sistema como o de controlo ON/OFF são soluções que implicam a existência de um sensor de temperatura (neste caso um termopar tipo K). Como já foi referido anteriormente, neste caso em concreto, tal implica que o termopar se situe adjacente à face do elemento de Peltier e, sendo este de dimensões bastante reduzidas, o

utilizador teria que posicionar o seu dedo em cima do sensor e não na face do elemento, o que acarreta uma grande desvantagem do ponto de vista de utilização.

Procurou-se, por isso, tentar encontrar uma solução que não esteja dependente de feedback.

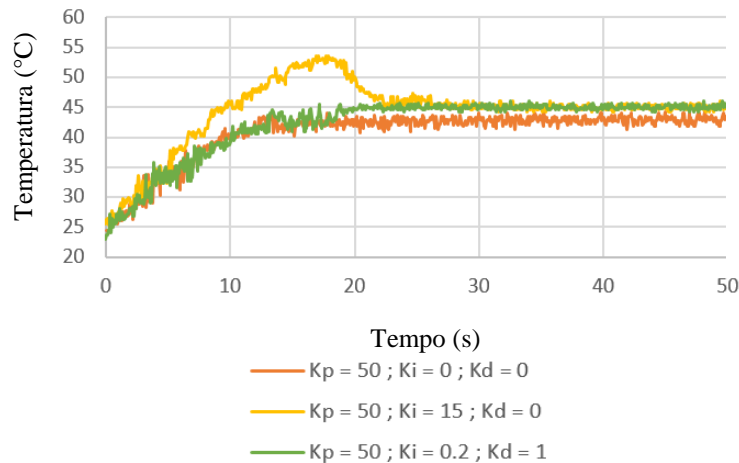


Figura 4.7 - Controlo com um PID ajustado com diversos parâmetros (P, PI e PID)

4.4.3 Controlo por tempo de resposta

Este tipo de controlo consistiu em estudar o tempo de resposta que o elemento de Peltier demora para atingir o valor pretendido.

Assim sendo, conferiu-se que para uma temperatura ambiente que se aproxime dos 25°C, o elemento de Peltier necessita de aproximadamente 7 segundos para atingir os 45°C. A partir desse instante (7 segundos), o valor do PWM é alterado, passando do máximo (255) para metade deste (127). Outros valores poderiam ter sido utilizados, mas concluiu-se que o sistema respondia bem para estes dois valores.

Este sistema de controlo, apesar de não ser tão elegante, não necessita de feedback, ao contrário dos outros sistemas apresentados neste capítulo, o que constitui uma grande vantagem em termos de utilização.

A principal desvantagem deste sistema é que o seu funcionamento está dependente da temperatura ambiente. Se esta se afastar muito dos 25°C (digamos 15°C), o sistema em 7 segundos não irá variar entre valores próximos do pretendido, mas sim para valores menores.

Esta dificuldade pode ser ultrapassada com a caracterização do tempo de resposta do elemento até à temperatura pretendida, para diferentes valores de temperatura ambiente, recorrendo ao termopar para tal finalidade. Assim sendo, estudou-se o tempo que o sistema demora a reagir para vários valores de temperatura exterior, conseguindo obter um tempo de resposta em função dessa mesma temperatura. Seria apenas necessário saber o valor da temperatura no espaço onde o sistema iria ser utilizado, antecipando o comportamento do sistema.

A figura 4.8 mostra a resposta do sistema com recurso a este método. Pode ser inferido que a sua resposta é bastante satisfatória, visto que os valores variam num intervalo próximo do valor pretendido, cumprindo os requisitos postos em causa.

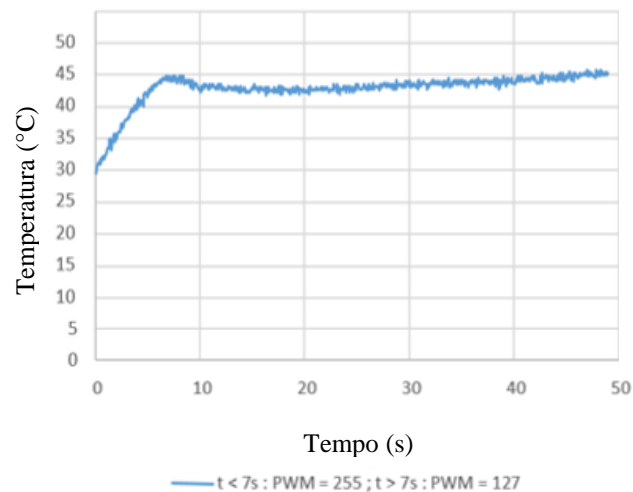


Figura 4.8 - Controlo por tempo de resposta

Capítulo 5 - Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões

O trabalho cumpriu o seu desígnio na medida em que a prova de conceito foi estabelecida com sucesso, tendo sido criada uma interface que estimula o utilizador através de um feedback térmico criado por um elemento de Peltier.

O projeto final possui dimensões relativamente reduzidas, sendo facilmente transportável e utilizável em qualquer tipo de ambiente.

A aplicação desenvolvida em *Processing* é suportada por Java e portanto funciona num qualquer dispositivo.

A monitorização digital de temperatura com o conjunto termopar/integrado MAX31855 foi bastante eficaz e mais satisfatória do que um sensor analógico permitiria.

O controlo de temperatura ON/OFF permite controlar bem a resposta do elemento para que este não ultrapasse os valores limite de aquecimento. O controlo com um PID garante que esse valor corresponde à temperatura de referência, sendo atingida com o máximo rigor possível. No entanto ambas necessitam de um sensor de feedback junto ao elemento de Peltier para seu funcionamento.

O controlo efetuado tendo como base o tempo de resposta do elemento de Peltier fica dependente da temperatura ambiente rondar os 25°C. Se o valor diferir muito deste, a temperatura de estabilização no aquecimento será também ela bastante diferente da esperada (45°C). A grande vantagem passa por não ser necessário incluir nenhum sensor de feedback com este método, resultando numa solução ainda mais compacta.

Ficou, no entanto, a faltar um passo importante na realização deste projeto, que consistiria no contacto com profissionais da área da reabilitação, o que permitiria uma

validação deste dispositivo, bem como uma melhoria do mesmo tendo em conta o feedback dos utilizadores.

5.2 Trabalhos futuros

O trabalho desenvolvido pode ser futuramente melhorado e complementado com ligeiras mudanças perfeitamente alcançáveis e que elevariam a qualidade deste projeto, tais como:

- Melhoria da interface gráfica para que o uso não seja tão restrito e vocacionado somente à reabilitação;
- Solução final mais compacta, criando porventura um *printed circuit board* (PCB) englobando todos os componentes;
- Adição de um dispositivo externo para medir a temperatura ambiente de modo a que o controlo por tempo de resposta fosse feito de acordo com esta, ajustando assim o tempo de aquecimento para diferentes temperaturas externas, de modo a garantir sempre a mesma temperatura de estabilização;
- Utilizar a solução existente no ThermoVR, formando uma superfície com 4 elementos de Peltier de dimensões bastante reduzidas, dois deles exclusivamente para aquecimento e os outros dois para arrefecimento, diminuindo drasticamente a inércia térmica do sistema;
- Utilizar dois elementos de Peltier sobrepostos, de modo a que as faces em contacto estivessem sempre a dar estímulos contrários de quente e frio, aumentando também a eficácia da solução em termos de resposta;
- Testar estas duas últimas soluções em conjunto: juntar esta sobreposição de elementos de Peltier à solução incorporada no dispositivo ThermoVR, criando uma malha de 8 elementos, ou seja, dois níveis de 4 elementos de Peltier sobrepostos. Esta seria, à partida, a solução final cujo tempo de resposta seria mínimo.
- Implementação de múltiplos estímulos sensoriais e não somente feedback de temperatura.

Referências

- [1] E. S. A. da Silva, C. Bouchard, J.-F. Omhover, and W. K. Junior, "Sensory; Semantics and Emotional Relationship in Tactile Macrotextures Selection of Industrial Products," *Linköping Univ. Electron. Press*, no. 100, p. 12, 2014.
- [2] S. Bar-Shalita, T., Vatine, J.J., & Parush, "Sensory modulation disorder: a risk factor for participation in daily life activities.," *Dev. Med. Child Neurol.* 50, 932-937, 2008.
- [3] D. N. Ahn, R., Miller, L. J., Milberger, S., & McIntosh, "Prevalence of parents' perceptions of sensory processing disorders among kindergarten children," *Am. J. Occup. Ther.* 58(3), 287-302, 2004.
- [4] M. Kim, S., Berkley, J.J. & Sato, "Virtual Reality," *Springer-Verlag*, vol. 6, pp. 1–4, 2003.
- [5] T. Im, I. Yun, and S. Kim, "Holistic Haptic Education Platform for Developmental Disorder Children," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 12, no. 17, pp. 6615–6622, 2017.
- [6] TechTimes, "Gloveone Smart Gloves Will Let You Feel Virtual Reality," 2015. [Online]. Available: <http://www.techtimes.com/articles/59002/20150609/smart-gloves-by-gloveone-will-let-you-feel-virtual-reality.htm>. [Accessed: 13-Oct-2017].
- [7] RoadToVR, "Hands-on: Gloveone's Newest Haptic Glove Has Impressive Tracking Tech," 2016. [Online]. Available: <https://www.roadtovr.com/hands-on-gloveones-newest-haptic-glove-has-impressive-tracking-tech/>. [Accessed: 13-Oct-2017].
- [8] Z. Chen, "ThermoReality : Thermally Enriched Head Mounted Displays for Virtual Reality," *Assoc. Comput. Mach. Inc*, vol. 1, pp. 1–2, 2017.
- [9] R. L. Peiris, W. Peng, Z. Chen, L. Chan, and K. Minamizawa, "ThermoVR : Exploring Integrated Thermal Haptic Feedback with Head Mounted Displays," *Assoc. Comput. Mach. Inc*, pp. 5452–5456, 2017.
- [10] D. C. Spanner, "The Peltier Effect and its Use in the Measurement of Suction Pressure," *J. Exp. Bot. Vol. 2, No. 5 (1951), pp. 145-168 Publ.*, vol. 2, no. 5, pp. 145–168, 2016.
- [11] F. J. Disalvo, "Thermoelectric Cooling and Power Generation," *Science (80-.)*, vol. 703, no. 1999, 2012.
- [12] R. A. Taylor and G. L. Solbrekken, "Comprehensive System-Level Optimization of Thermoelectric Devices for Electronic Cooling Applications," *IEEE Trans. components Packag. Technol.*, vol. 31, no. 1, pp. 23–31, 2008.
- [13] John F. Lee & Francis Weston Sears, "Termodinâmica," *Editora da Universidade de São Paulo*, 1969. .

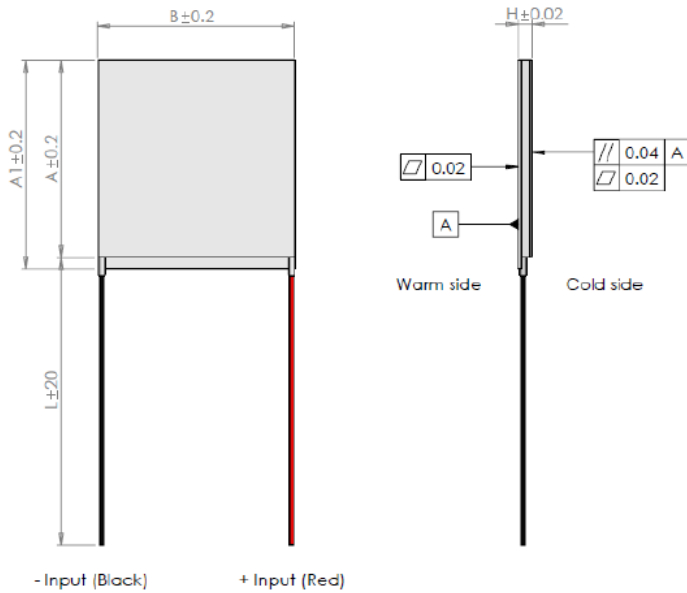
- [14] LibreTexts, "P-Type, N-Type Semiconductors." [Online]. Available: https://photon.libretexts.org/The_Science_of_Solar/Solar_Basics/D._P-N_Junction_Diodes/I._P-Type%2C_N-Type_Semiconductors. [Accessed: 10-Oct-2017].
- [15] PowerScientific, "The Past, Present and Future of Refrigeration." [Online]. Available: <http://powersscientific.com/the-past-present-and-future-of-refrigeration/>. [Accessed: 11-Oct-2017].
- [16] M. Scervini, "Thermocouples Operating Principles," *Dep. Mater. Sci. Metall. Univ. Cambridge*, 2009.
- [17] J. Shtargot and S. Mirza, "Modern Thermocouples and a High-Resolution Delta-Sigma ADC Enable High-Precision Temperature Measurement," *MaxInt J.*, 2011.
- [18] SensorLab, "Mbed vs Arduino," 2013. [Online]. Available: <http://slab.concordia.ca/2013/mbed/mbed-comparison-test/>. [Accessed: 14-Oct-2017].
- [19] MaximIntegrated, "How to Control and Compensate a Thermoelectric Cooler (TEC)," 2004. [Online]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3318>. [Accessed: 14-Oct-2017].
- [20] T. Hirzel, "PWM." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>. [Accessed: 27-Dec-2017].
- [21] B. Fry, "Processing Overview." [Online]. Available: <https://processing.org/tutorials/overview/>. [Accessed: 26-Dec-2017].
- [22] R. P. Bansevicius, R. Račkienė, and J. A. Virbalis, "The body cooling system integrated into the clothes," *Institutional Repos. Kaunas Univ. Technol.*, 2007.
- [23] Instructables, "How to Use the L293D Motor Driver - Arduino Tutorial," 2017. [Online]. Available: <http://www.instructables.com/id/How-to-use-the-L293D-Motor-Driver-Arduino-Tutorial/>. [Accessed: 05-Mar-2018].
- [24] Instructables, "K-Type Arduino Thermometer." [Online]. Available: <http://www.instructables.com/id/K-type-Arduino-thermometer/>. [Accessed: 17-Mar-2018].
- [25] Instructables, "How to use an LCD display - Arduino Tutorial." [Online]. Available: <http://www.instructables.com/id/How-to-use-an-LCD-displays-Arduino-Tutorial/>. [Accessed: 05-Mar-2018].

Anexo A: Elemento de Peltier

ET-007-10-15

Peltier cooler module

Data sheet



I _{max}	[A]	3.2
V _{max}	[Vdc]	0.9
P _c max	[W]	1.6
ΔT _{max}	[°C]	74
A	[mm]	8
A1	[mm]	8
B	[mm]	8
H	[mm]	3.8
L	[mm]	100
Wire	AWG	n/a

- (At hot side temperature $T_h = 25^\circ\text{C} / 298\text{K}$, under dry N_2)
- P_c max = Cooling power at $\Delta T = 0$ and $I = I_{\text{max}}$
- ΔT_{max} = Temperature difference at $I = I_{\text{max}}$ and $P_c = 0$
- Max hot side temperature $T_h = 90^\circ\text{C}$ for best long term performance
- Max mounting pressure: 1.5MPa
- Wires: UL-style 1569, 105°C (Unstripped)

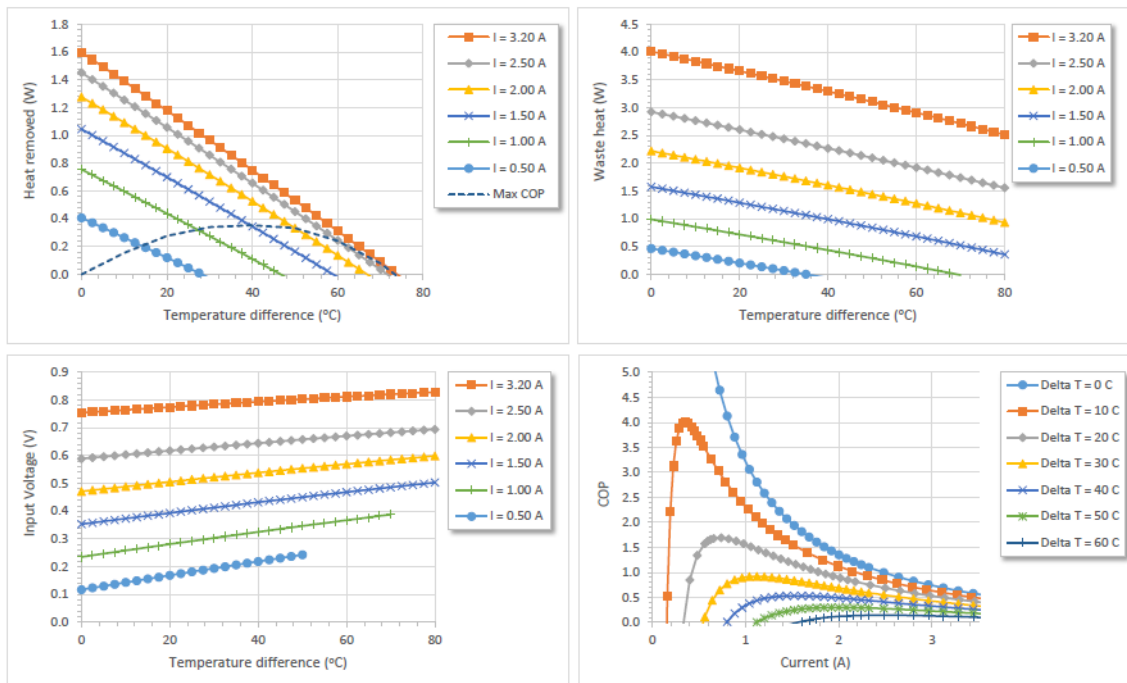


Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
 Web: www.etdyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etdyn.com

ET-007-10-15

Peltier cooler module

Data sheet - At hot side temperature 25°C



*Note - Waste heat = Heat out of hot side

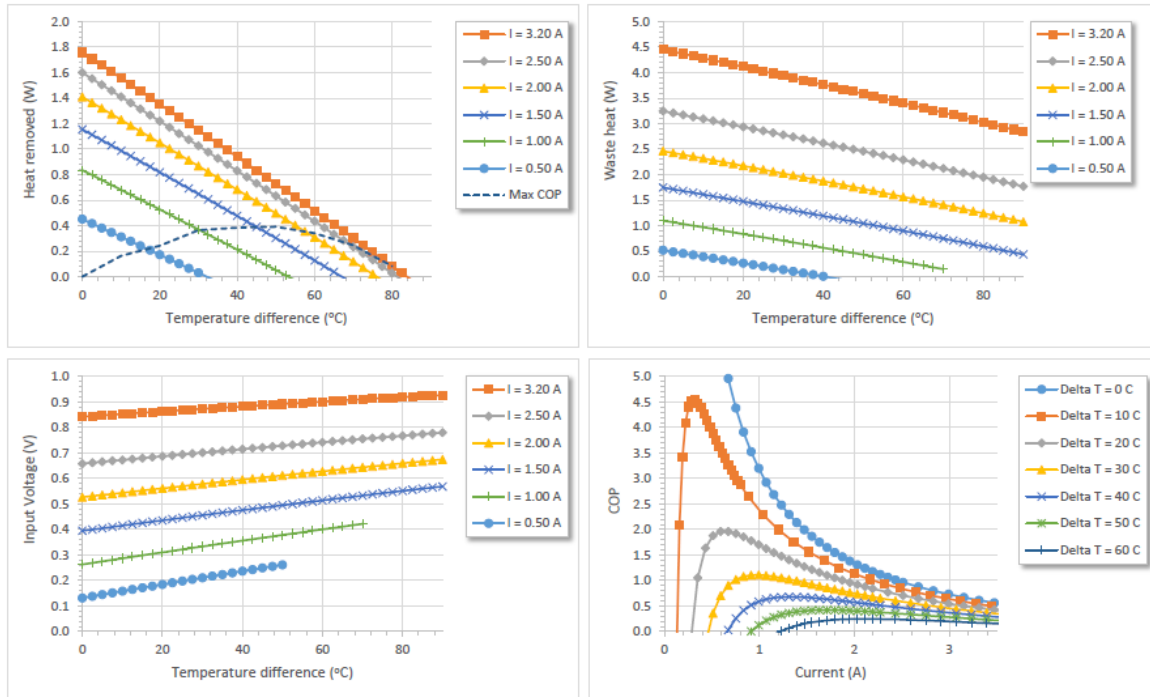


Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
 Web: www.etchedyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etchedyn.com

ET-007-10-15

Peltier cooler module

Data sheet - At hot side temperature 50°C



*Note - Waste heat = Heat out of hot side



Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
 Web: www.etcyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etcyn.com